

饱和—非饱和渗流有限元法、软件及工程应用

吴梦喜

中国科学院力学研究所

2009年8月25日

内容标题

- 1 渗流有限元基本理论与方法
- 2 渗流计算中的问题
- 3 利科渗流有限元软件SEEPAGE
- 4 工程应用算例

1 渗流有限元基本理论与方法

基本微分方程 Richards 方程

$$[k_{ij}(\psi)(\psi + z)_{,j}]_{,i} = \dot{\theta} \quad (1)$$

饱和度—孔压关系Van Genuchten公式

$$s_e(\psi) = \frac{\theta(\psi) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \begin{cases} (1 + |\alpha_v \psi|^{n_v})^{-m_v}, & \psi < 0 \\ 1, & \psi \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

透水率与饱和度关系Mualem模型

$$k(s_e) = k_s s_e^{1/2} [1 - (1 - s_e^{1/m_v})^{m_v}]^2 \quad (3)$$

两类边界条件：水头边界、流量边界

■ 对时间项用积分法推导方程

$$\sum_e \int_{t^{n-1}}^{t^n} \int_{\Omega_e} N_{I,i} k_r(\psi) K_{ij} N_{J,j} d\Omega \cdot (\psi + z)_J dt + \sum_e \int_{t^{n-1}}^{t^n} \int_{\Omega_e} \varepsilon s'(\psi) N_I N_J d\Omega \cdot \frac{\partial \psi_J}{\partial t} dt =$$

$$\int_{t^{n-1}}^{t^n} \oint_L -q_n N_I dL dt + \sum_e \int_{t^{n-1}}^{t^n} \int_{\Omega_e} Q N_I d\Omega \cdot dt$$

■ 积分中值定理，渗透系数取时步内某种平均值

$$\sum_e \int_{\Omega_e} N_{I,i} K_{ij} N_{J,j} \tilde{k}_r(\psi) d\Omega \cdot (\psi^n + z)_J + \sum_e \int_{\Omega_e} \varepsilon \bar{s}'(\psi) N_I N_J / \Delta t^n d\Omega \cdot (\psi_J^n - \psi_J^{n-1}) =$$

$$\oint_L -\bar{q}_n N_I dL + \sum_e \int_{\Omega_e} \bar{Q} N_I d\Omega$$

geometric average $\tilde{k}_r(\psi) = \sqrt{k_r(\psi^n) \cdot k_r(\psi^{n-1})}$

explicit $k_r(\psi^{n-1})$

fully implicit $k_r(\psi^n)$

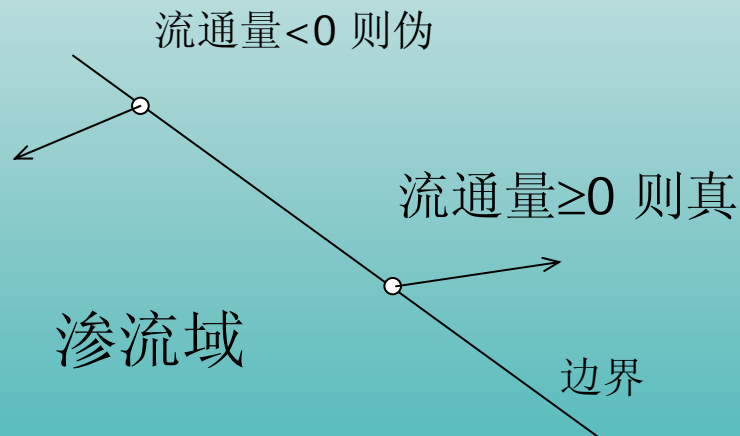
2 渗流有限元计算中的问题

- 溢出面边界问题
- 孔压间断问题
- 降雨入渗问题
- 质量守恒问题

溢出面边界处理方法

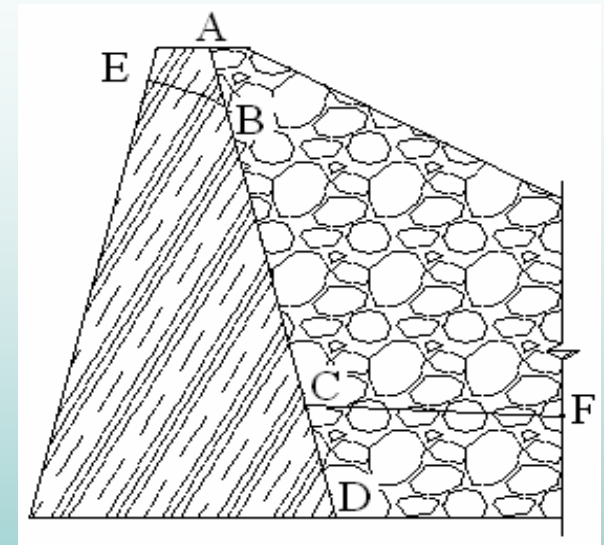
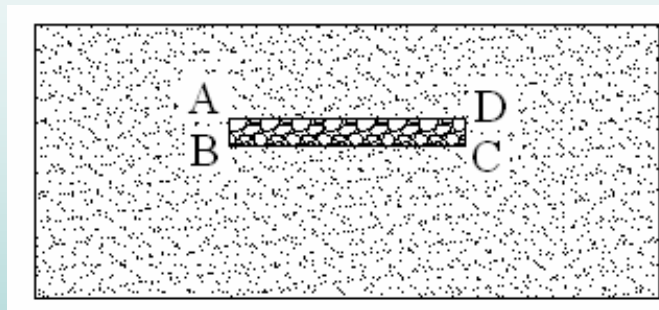
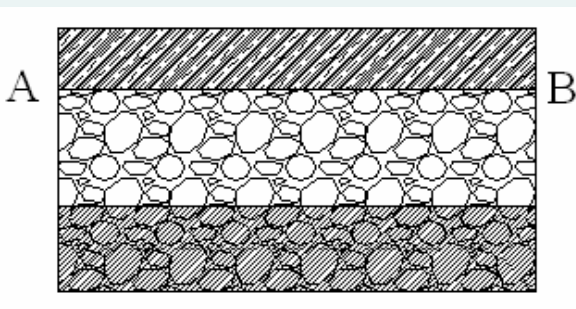
- 吴（1999）：依据溢出面结点的流量判断

$$Q_I = -K_{IJ}(\psi + z)_J$$



溢出面结点判别图

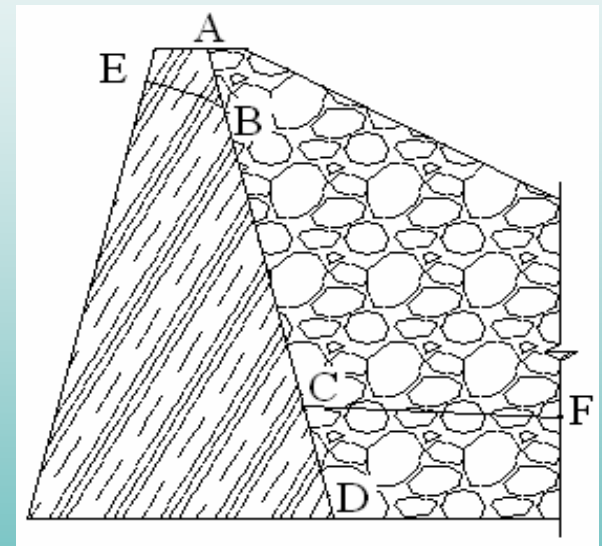
渗流场中孔压的间断现象



- 两种介质界面在非饱和区出现孔压间断
- 不模拟孔压间断结果与实际差异很大

孔压间断面模拟技术

- 两种介质界面在非饱和区，存在孔压间断。
- 接触情况分三种：
 1. 界面两侧土体非饱和，孔压间断 AB
 2. 渗透系数小的一侧土体饱和，大的一侧土体非饱和，孔压间断，BC
 3. 界面两侧土体饱和，孔压连续，CD

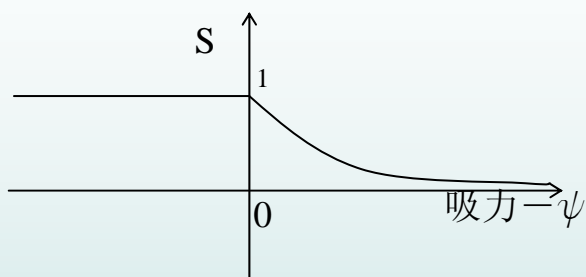


降雨入渗边界计算与反馈技术

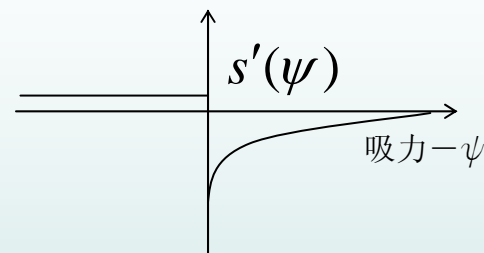
- 降雨量大于 0孔压边界入渗量，按0压边界处理
- 降雨量小于 0孔压边界入渗量，按流量边界处理
- 将孔压大于0的边界转换为0压边界，0压边界比较降雨量与入渗量，直到迭代收敛

质量守恒迭代技术

- Richards 方程是质量守恒的，其离散形式可能是不守恒的,原因是非饱和区渗透系数—饱和度—孔压之间高度非线性
- 含水量导数 $C(\psi)$ 取值
- Modified Picard （Celia, M. A., et al. 1990 ）迭代技术
- 吴：1999，普通Picard迭代技术



饱和度与吸力关系示意图



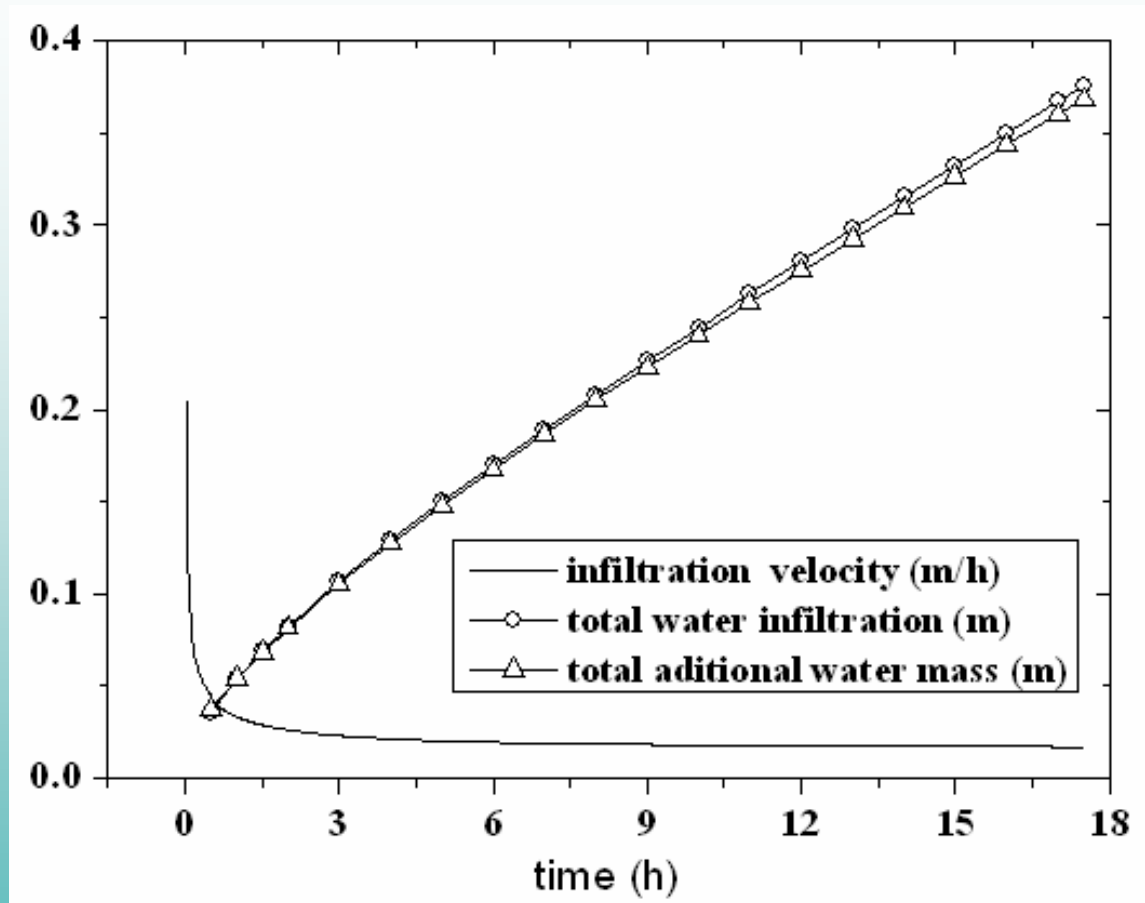
$s'(u)$ 与吸力关系示意图

■ 引入突变函数，实现质量守恒

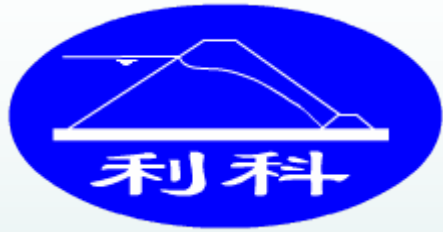
$$\beta(\psi) = \begin{cases} 1 & \psi < 0 \text{ 时} \\ 0 & \psi \geq 0 \text{ 时} \end{cases}$$

$$s'(\psi) = \begin{cases} \frac{s(\psi) - s(\psi_0)}{\beta(\psi) \cdot \psi - \beta(\psi_0) \cdot \psi_0}, & \beta(\psi) \cdot \psi - \beta(\psi_0) \cdot \psi_0 \neq 0 \text{ 时} \\ \frac{s(\psi - 0.01) - s(\psi_0)}{(\beta(\psi_0) \cdot \psi_0 - 0.01) - \beta(\psi_0) \cdot \psi_0}, & \beta(\psi) \cdot \psi - \beta(\psi_0) \cdot \psi_0 = 0 \text{ 时} \end{cases}$$

干土中入渗，质量守恒



Infiltration velocity and water mass vs. time

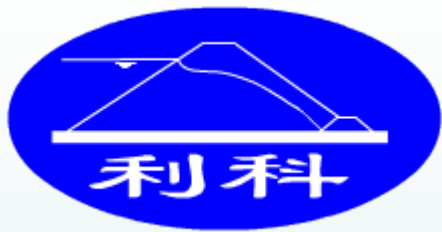


3 利科渗流软件SEEPAGE

解决了渗流孔压间断问题

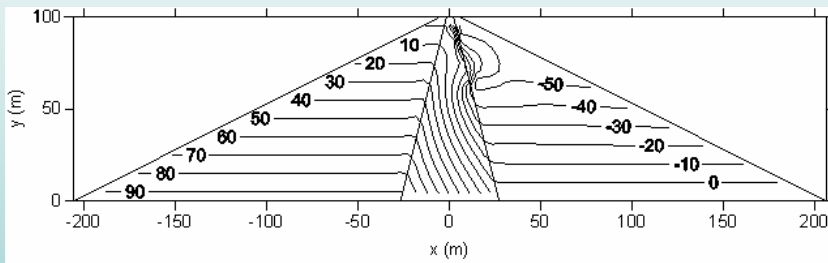
- 非稳定渗流计算经过试验验证
- 已经在瀑布沟、毛尔盖、扎雪、双江口、长河坝等工程中应用
- 能进行三维大规模问题的快速计算
- 软件推出后欢迎大家试用

<http://www.imech.ac.cn/seepage1.0/index.htm>

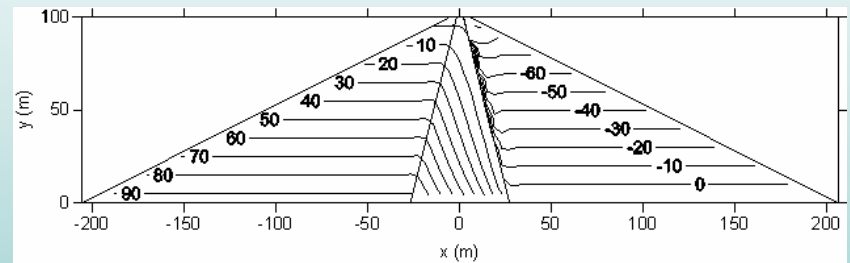


利科渗流软件的验证

孔压间断面的模拟



不考虑间断的孔隙水压力

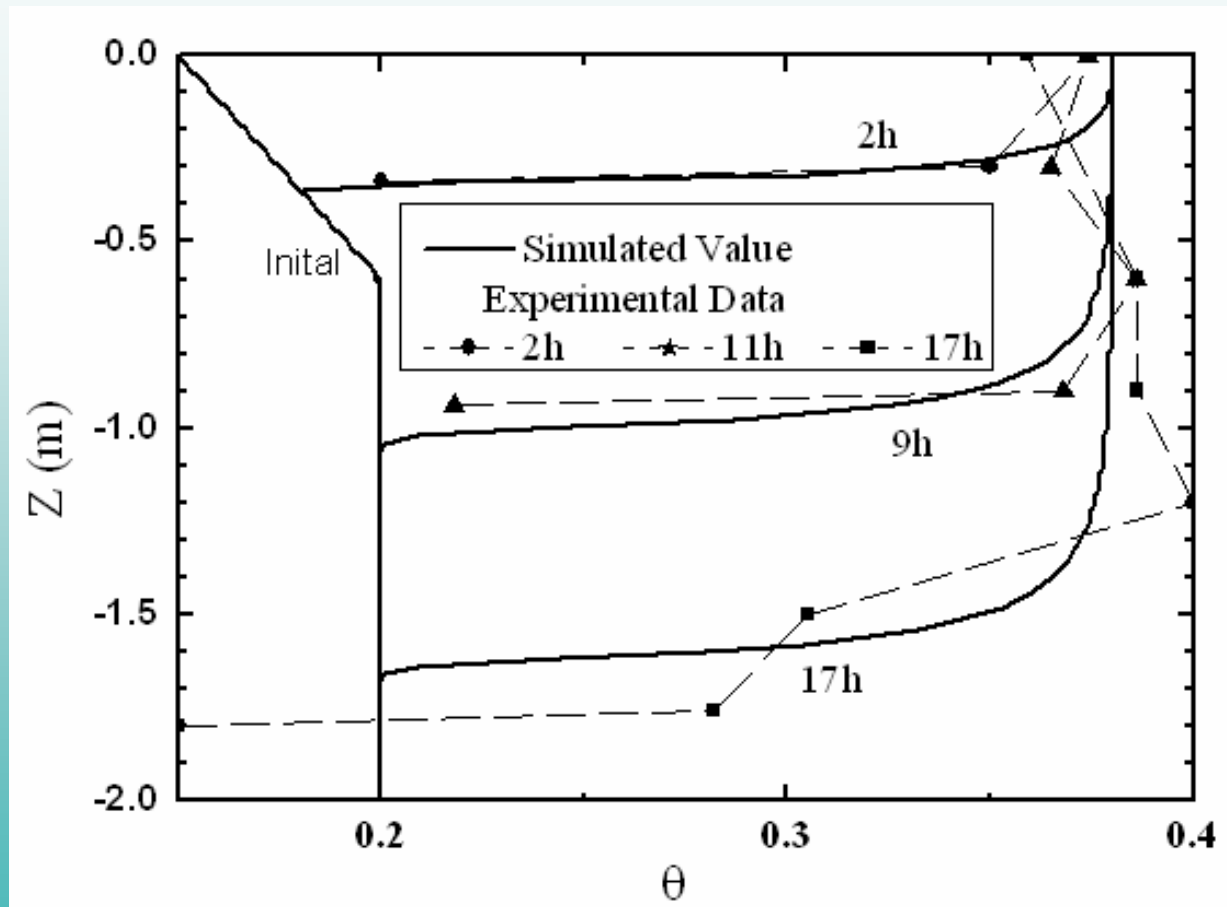


考虑间断后孔隙水压力

- 不考虑间断，计算不收敛
- 心墙中近接触面的孔压低于实际，得出较大的渗透坡降和渗流量



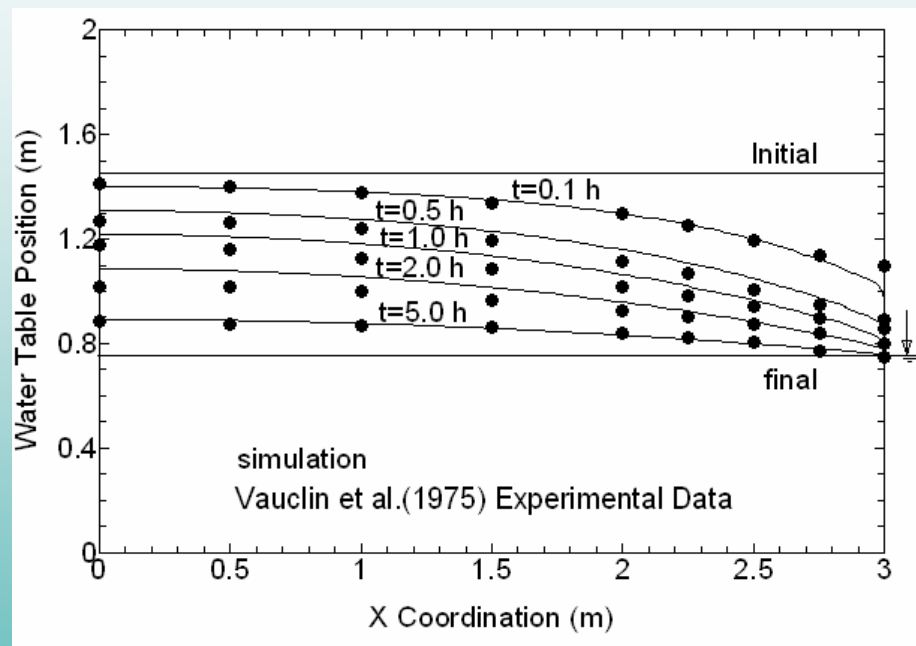
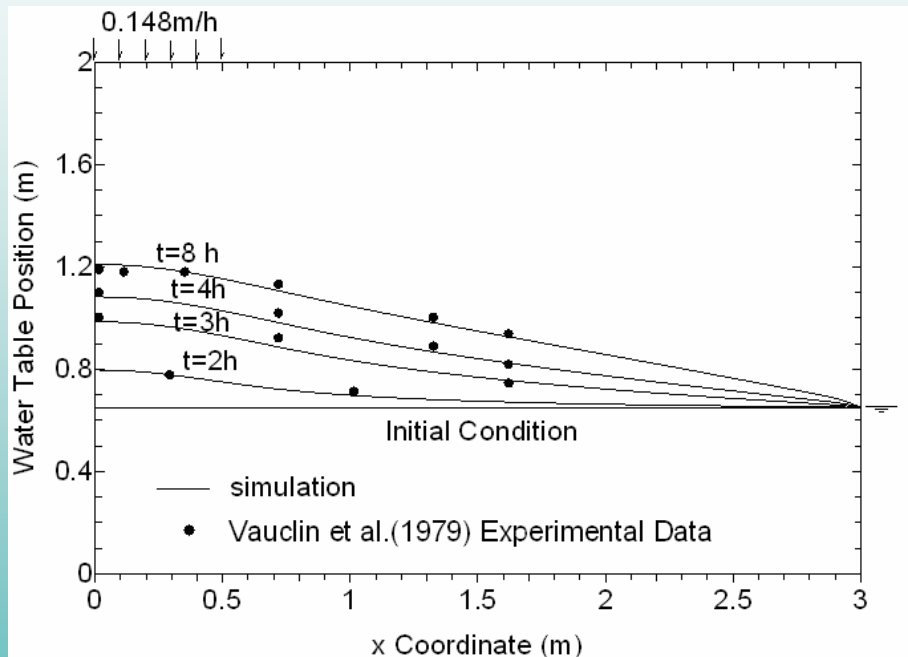
利科渗流软件的验证



- 干土中的一维现场入渗试验Warrick (1971)模拟

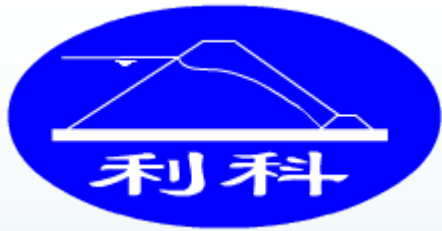


利科渗流软件的验证

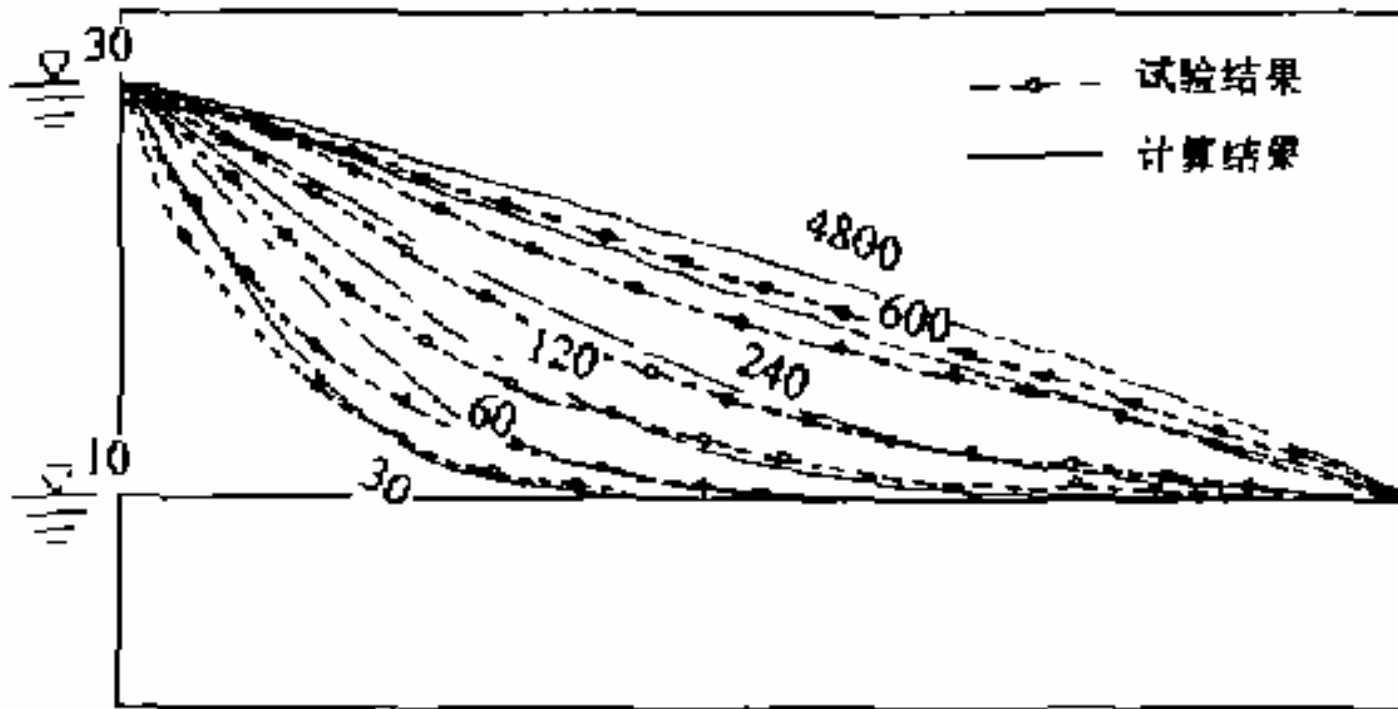


■ 降雨入渗模拟

■ 水位骤降模拟



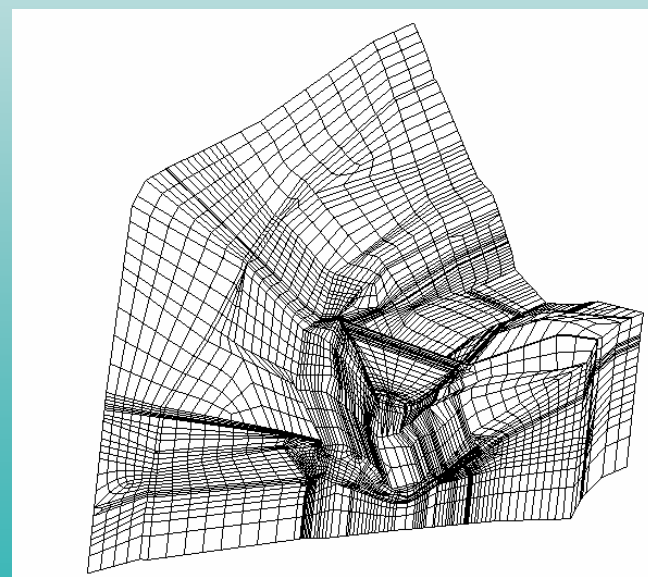
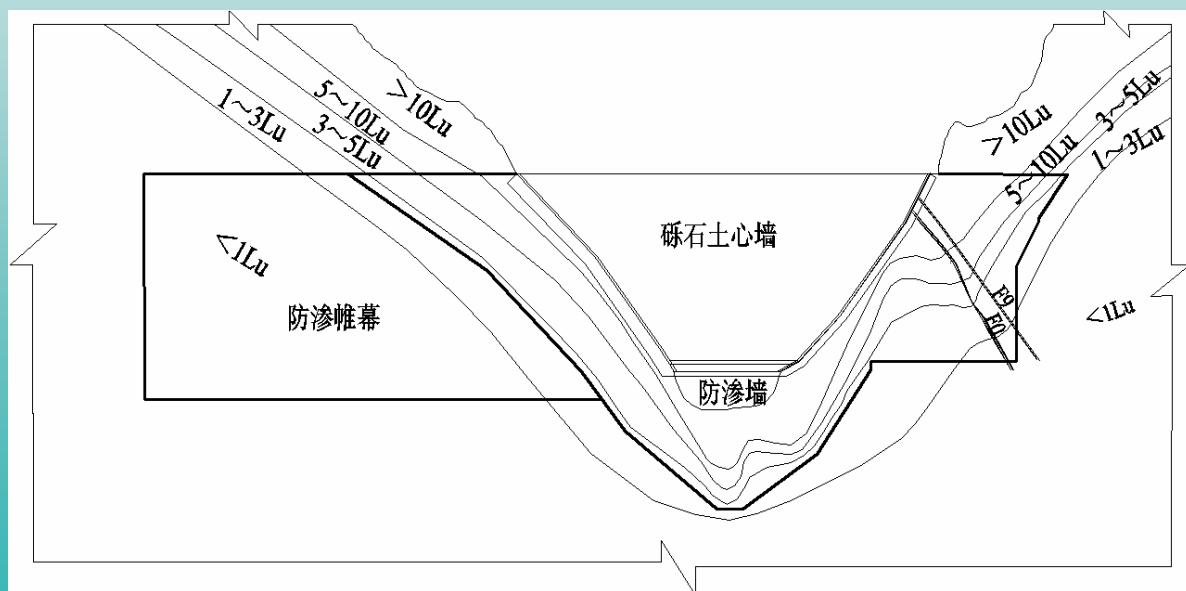
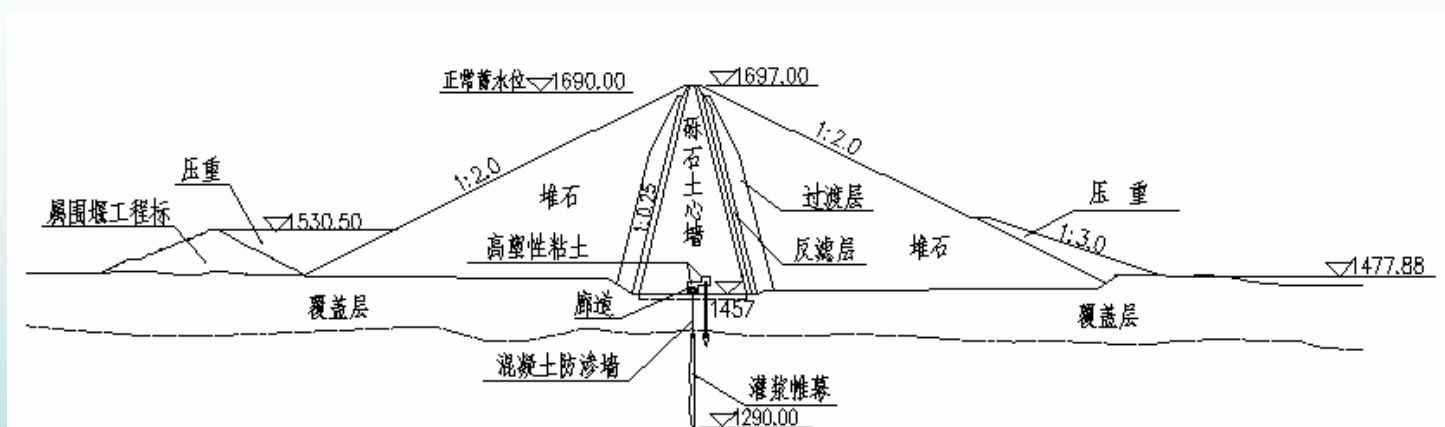
利科渗流软件的验证

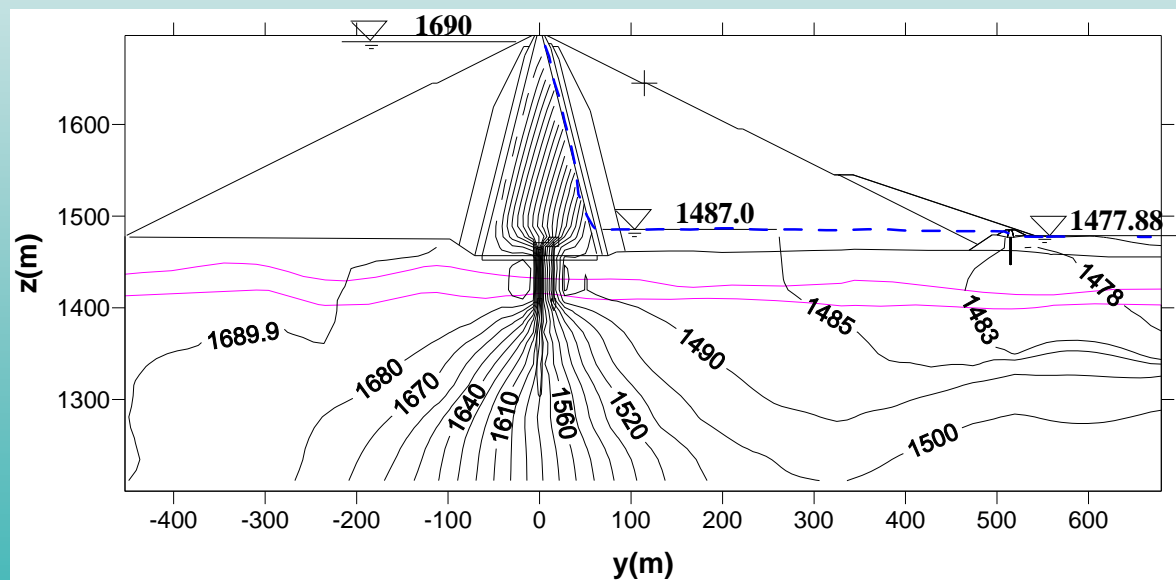
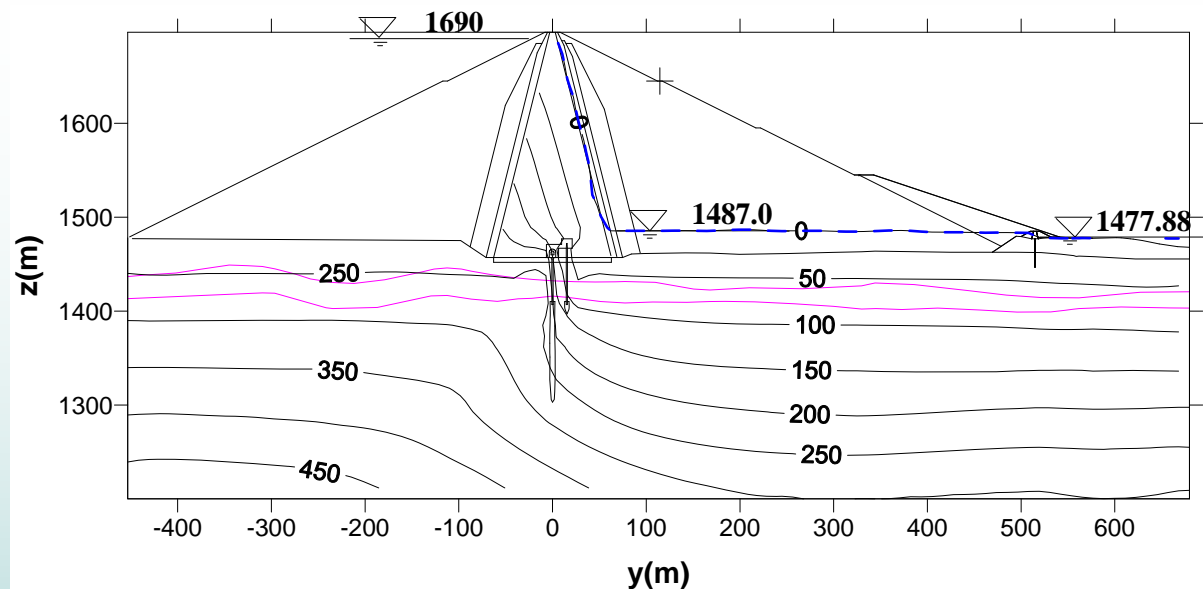


砂槽模型试验

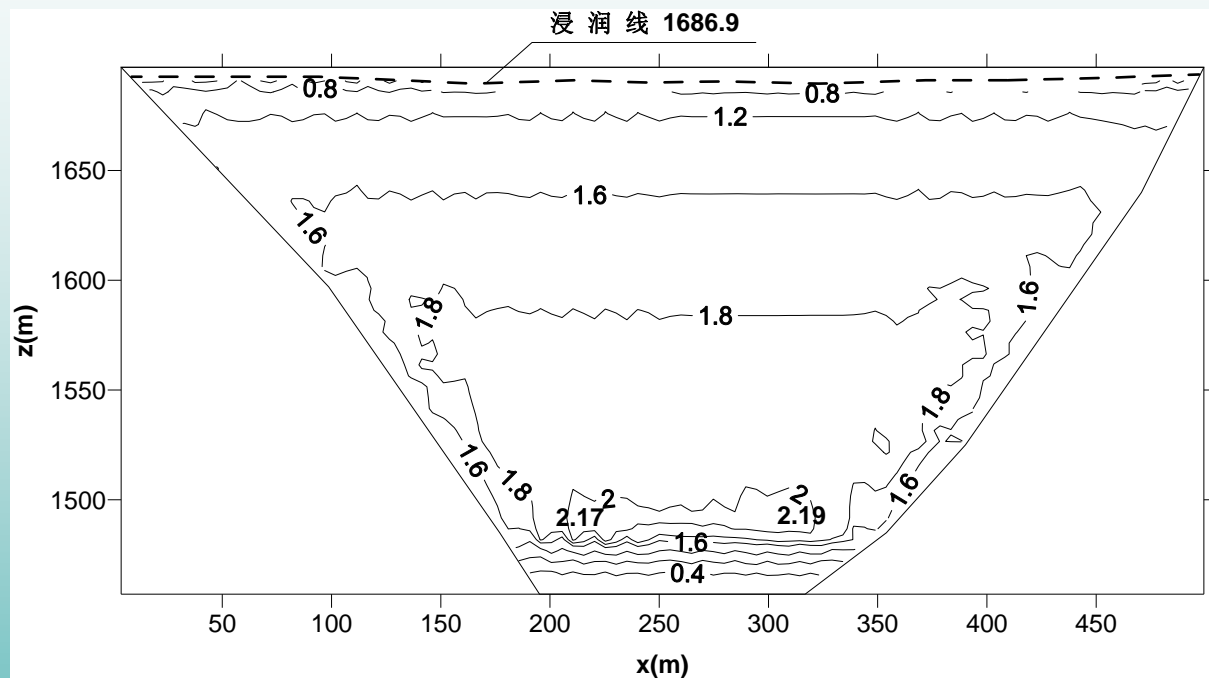
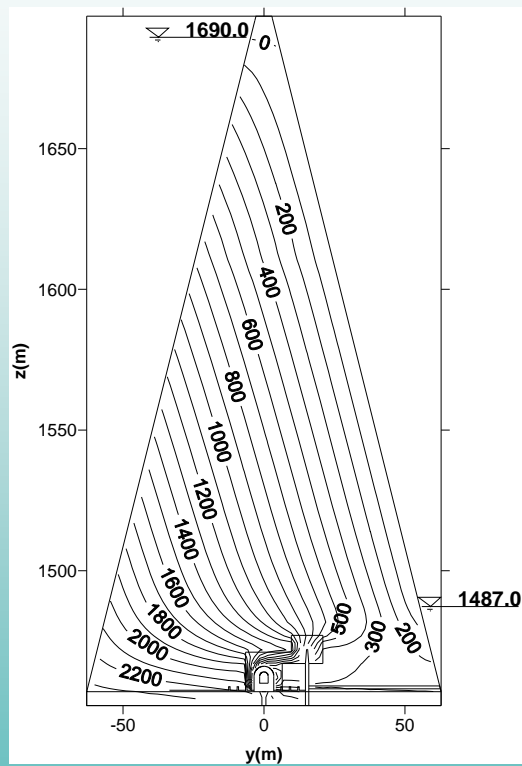
4 工程应用算例

长河坝典型剖面与防渗体系

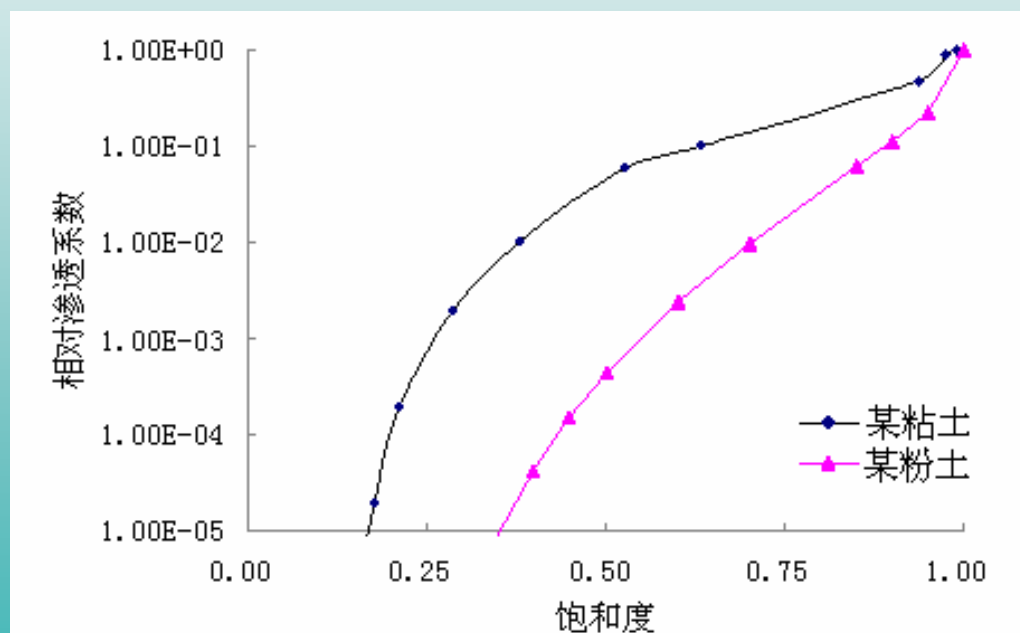
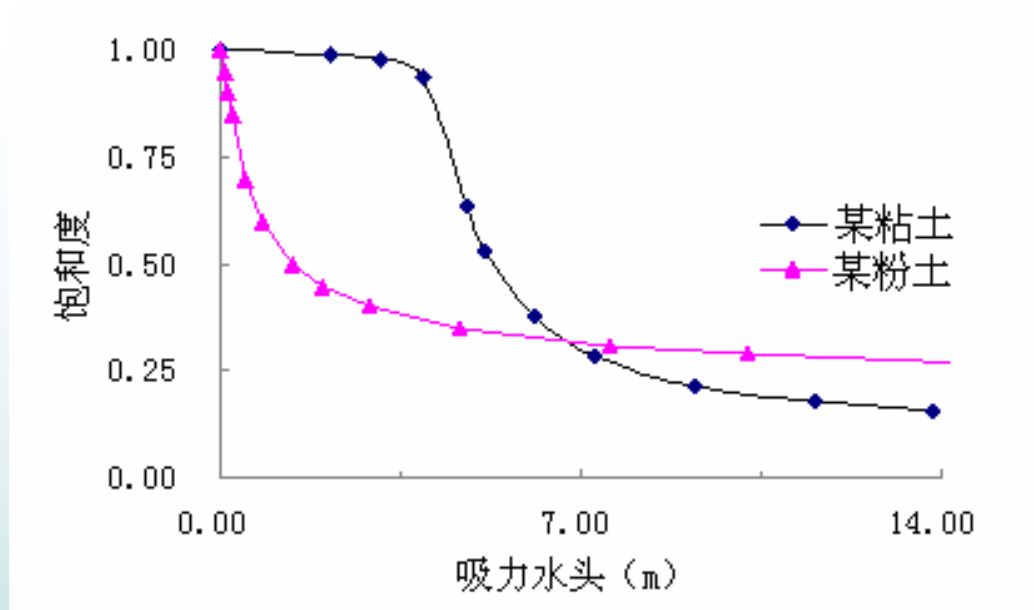




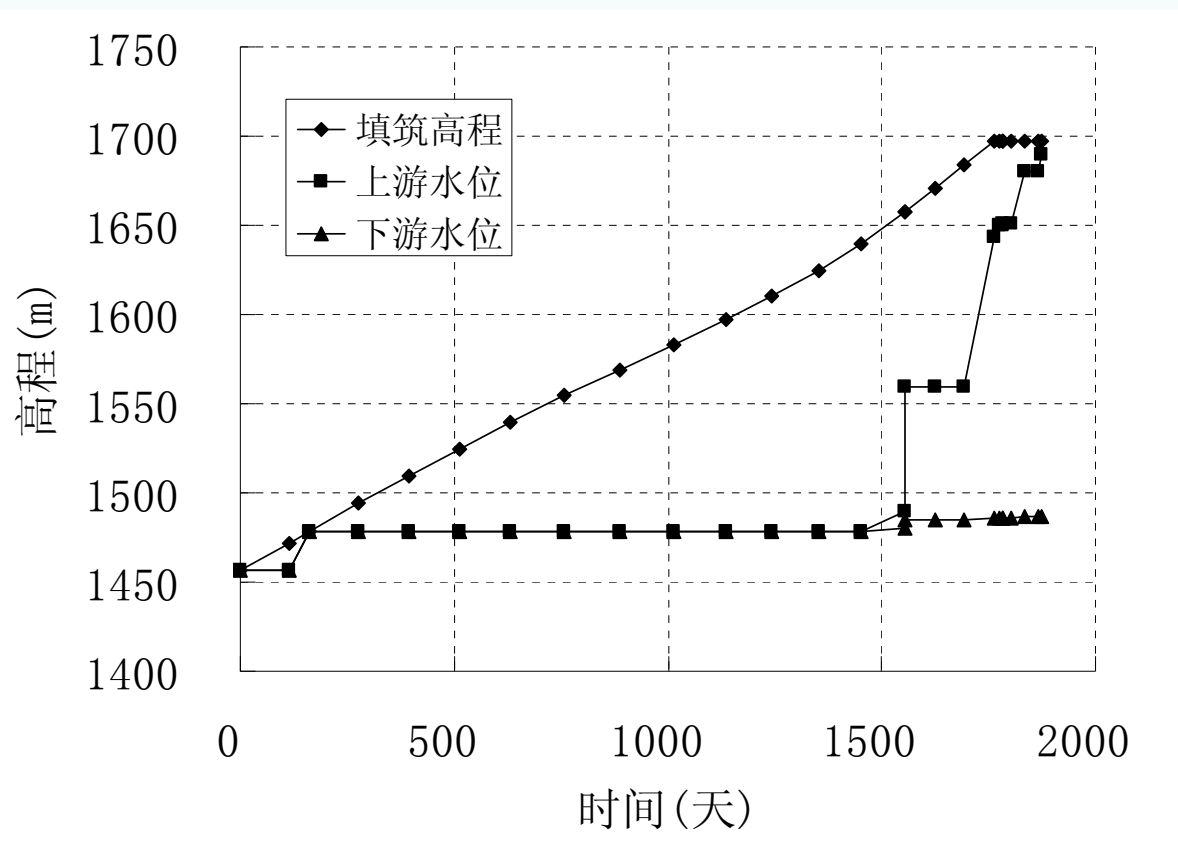
河谷纵剖面等压线与等水头线

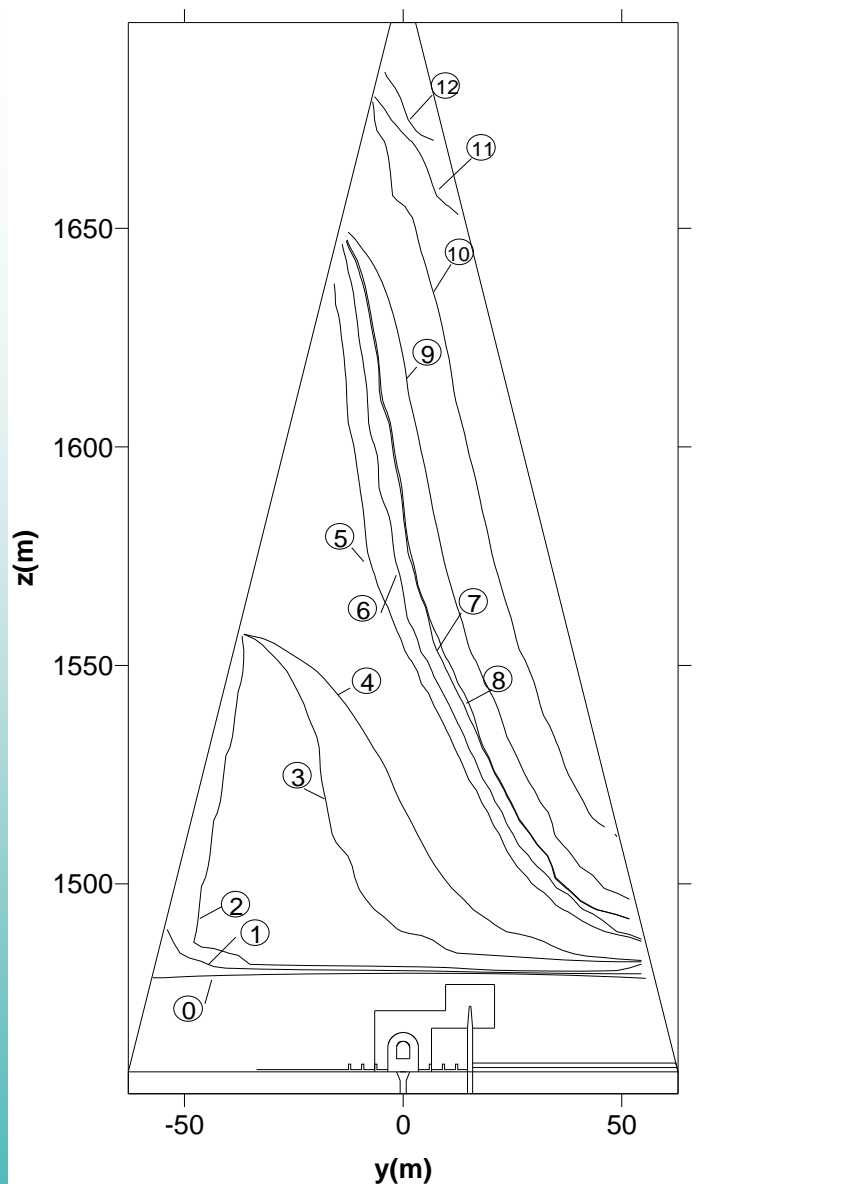


■ 心墙等压力及其下游面渗透坡降



■ 非饱和参数，长河坝介于这两者之间





0蓄水初始时刻；1蓄水第102天（库水位为1490m）；

2蓄水第105天（库水位为1559m）；

3蓄水第173天（库水位为1559m）；

4蓄水第243天（库水位为1559m）；

5蓄水第314天（库水位为1643m）；

6蓄水第323天（库水位为1650m）；

7蓄水第332天（库水位为1650m）；

8蓄水第333天（库水位为1651m）；

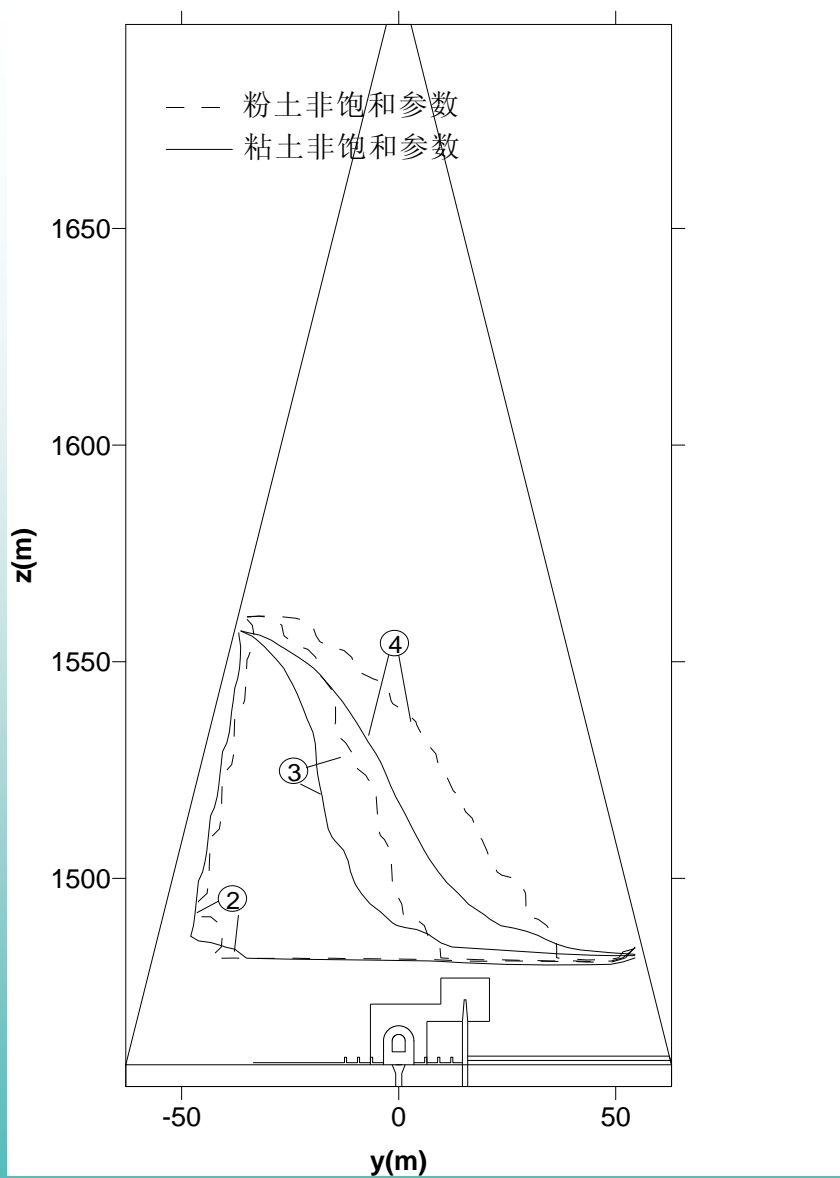
9蓄水第352天（库水位为1651m）；

10蓄水第382天（库水位为1680m）；

11蓄水第413天（库水位为1680m）；

12蓄水第423天（库水位为1690m）

■ 坝体心墙内部浸润线的发展过程

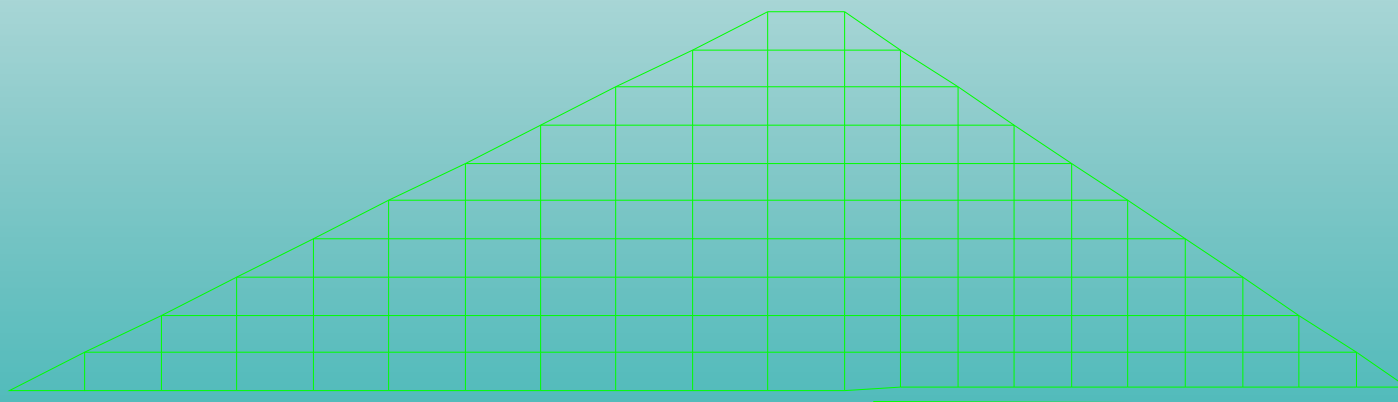


1蓄水第105天（库水位为1559m）；
3蓄水第173天（库水位为1559m）；
4蓄水第243天（库水位为1559m）

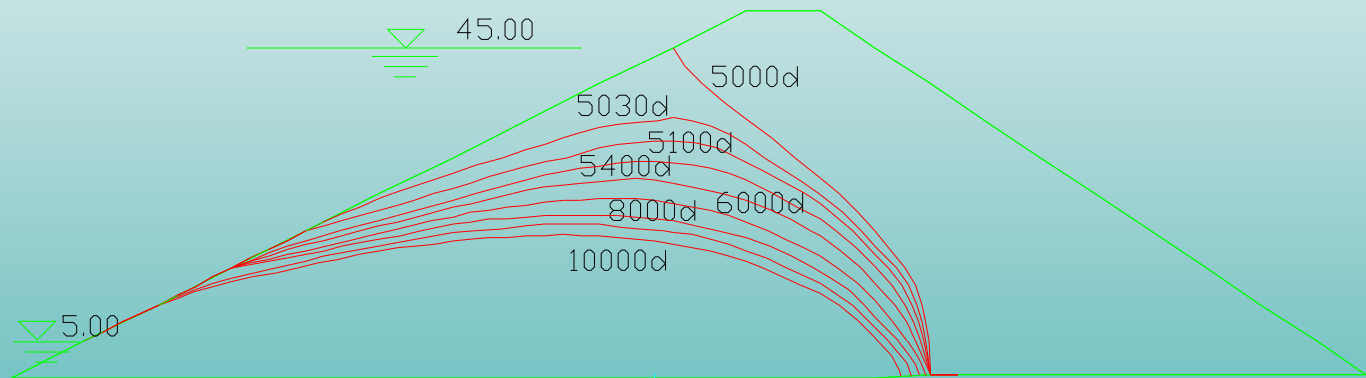
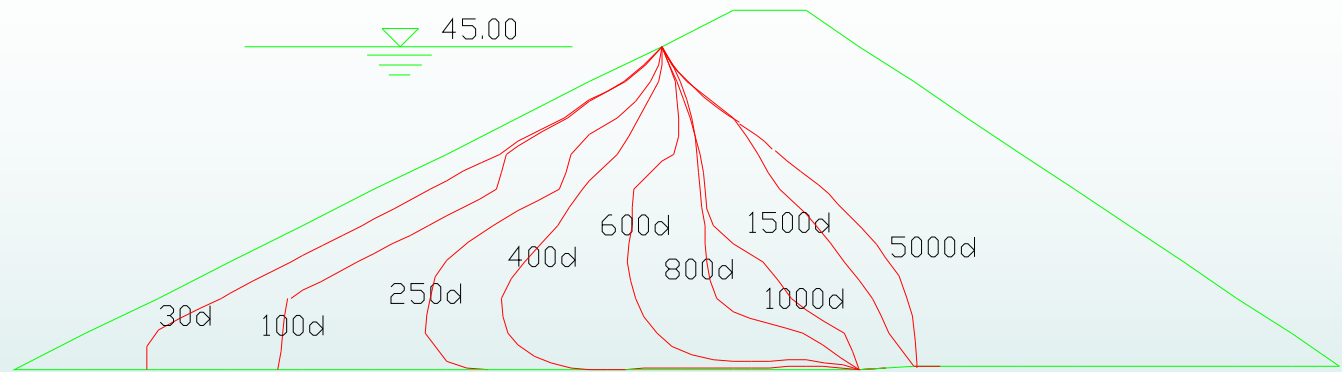
■ 不同土水特征曲线坝体心墙内部浸润线的发展过程

均质土坝算例

坝高50 m均质土坝，顶宽10 m，上游坝坡1:2，下游坝坡1:1.5，67.5 m 褥垫式排水，饱和渗透系数为 3.4×10^{-8} m /s，孔隙率为0.464，饱和度均80%，上下游无水。上游水位30 d内均匀上升至45.0 m，第5000 d上游水位开始下降，30 d内均匀降至5.0 m，下游水位均为0.0 m，计算库水上升和下降后坝体的浸润线变化过程和孔压分布情况，

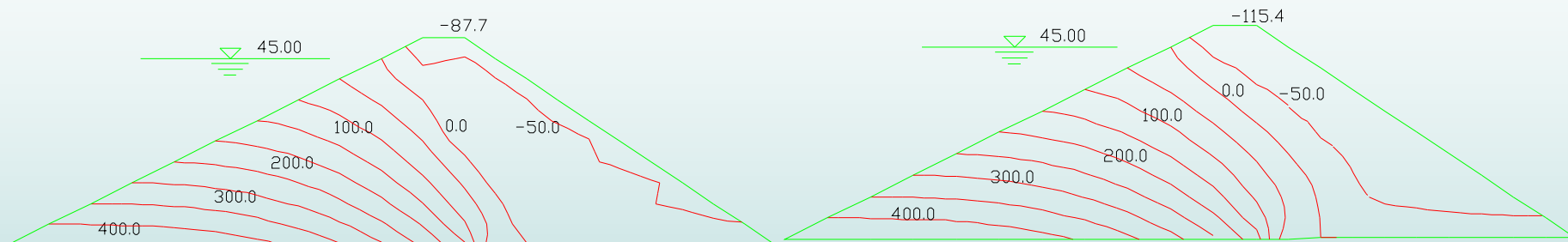


二维计算网格

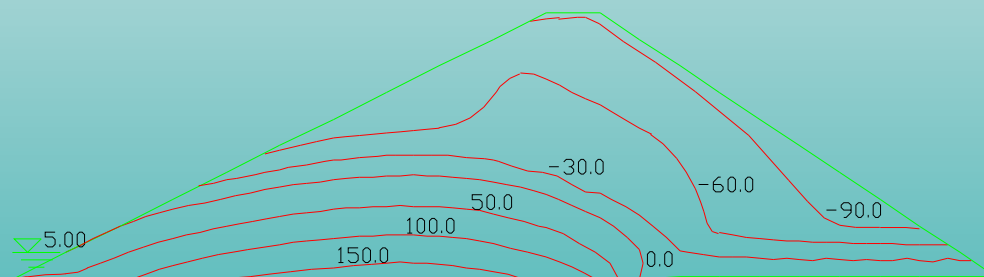


浸润线变化过程

孔压等值线情况



第1500d、5000d孔压等值线/kPa



第10000d孔压等值线/kPa

双江口工程

基本情况 大渡河上心墙堆石坝，左岸地下厂房，最大坝高约312m

- 河床覆盖层最深厚（最厚约67.8m）
- 心墙土坝、下游围堰、防渗帷幕、排水幕、断层
- 厂房地下洞室
- 含有孔压间断面

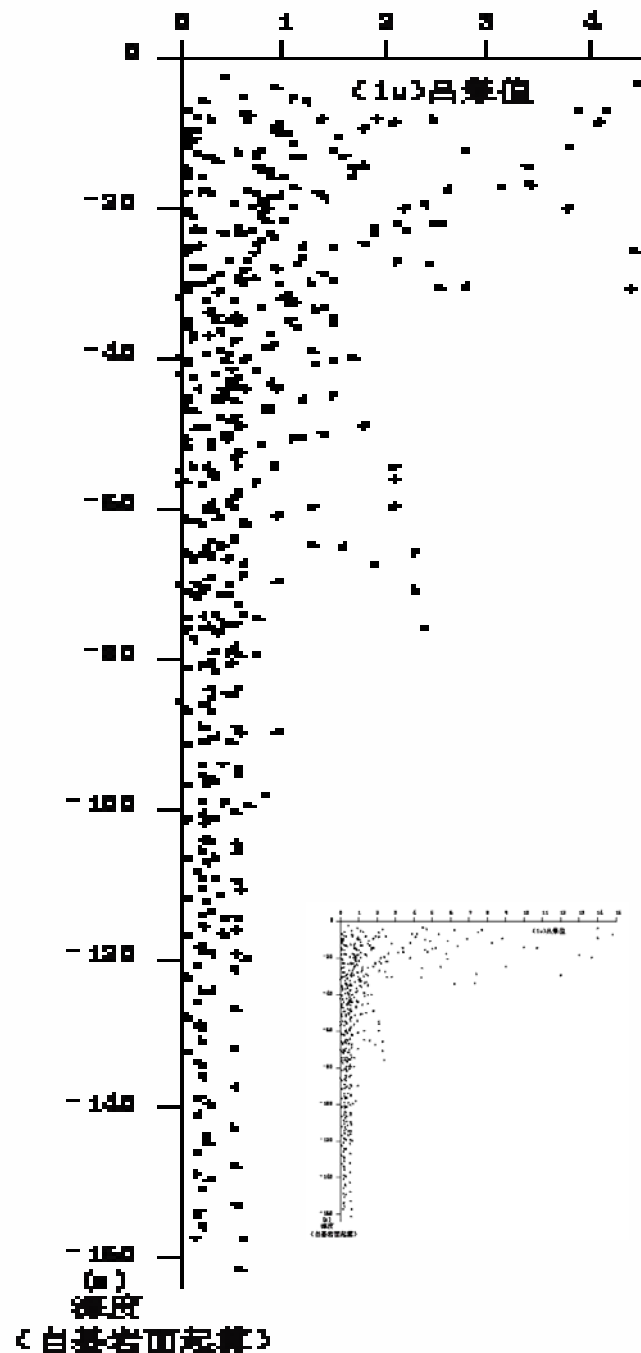
河床覆盖层

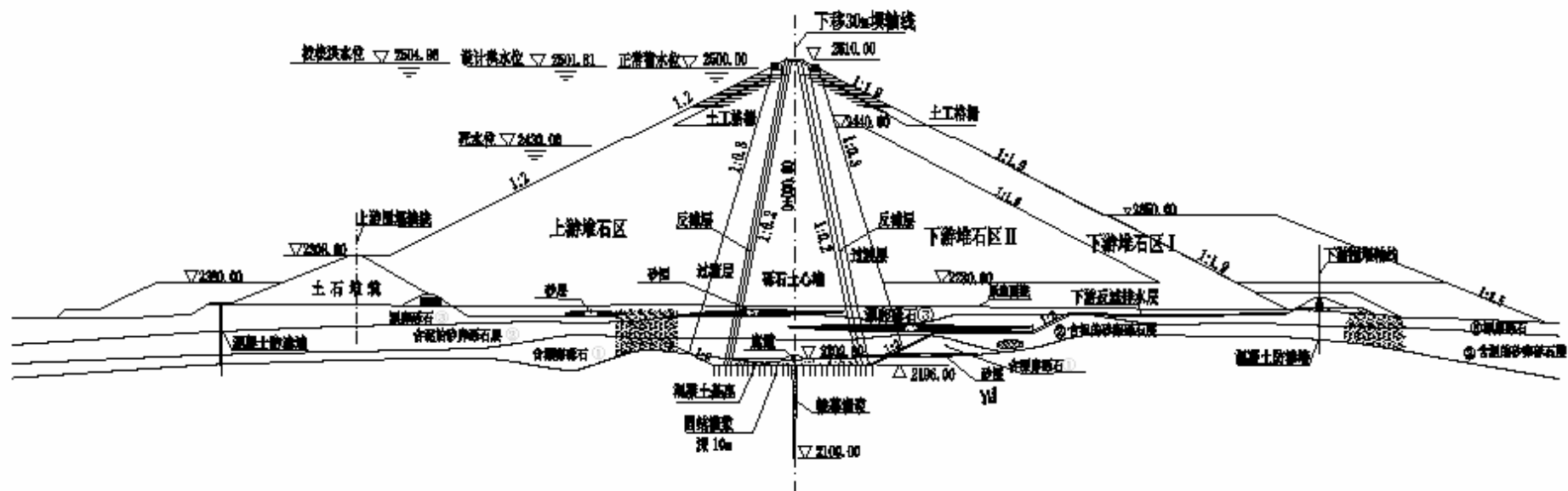
- 由漂卵石层和砂卵石层组成，强透水
- 漂卵石易产生管涌破坏，临界坡降0.22~0.86，破坏坡降0.41~3.52。
- 夹有多个砂层透镜体（厚度和范围较大），渗透性的差异，可能造成接触冲刷。

基岩

透水性弱，相对隔水层埋藏较浅

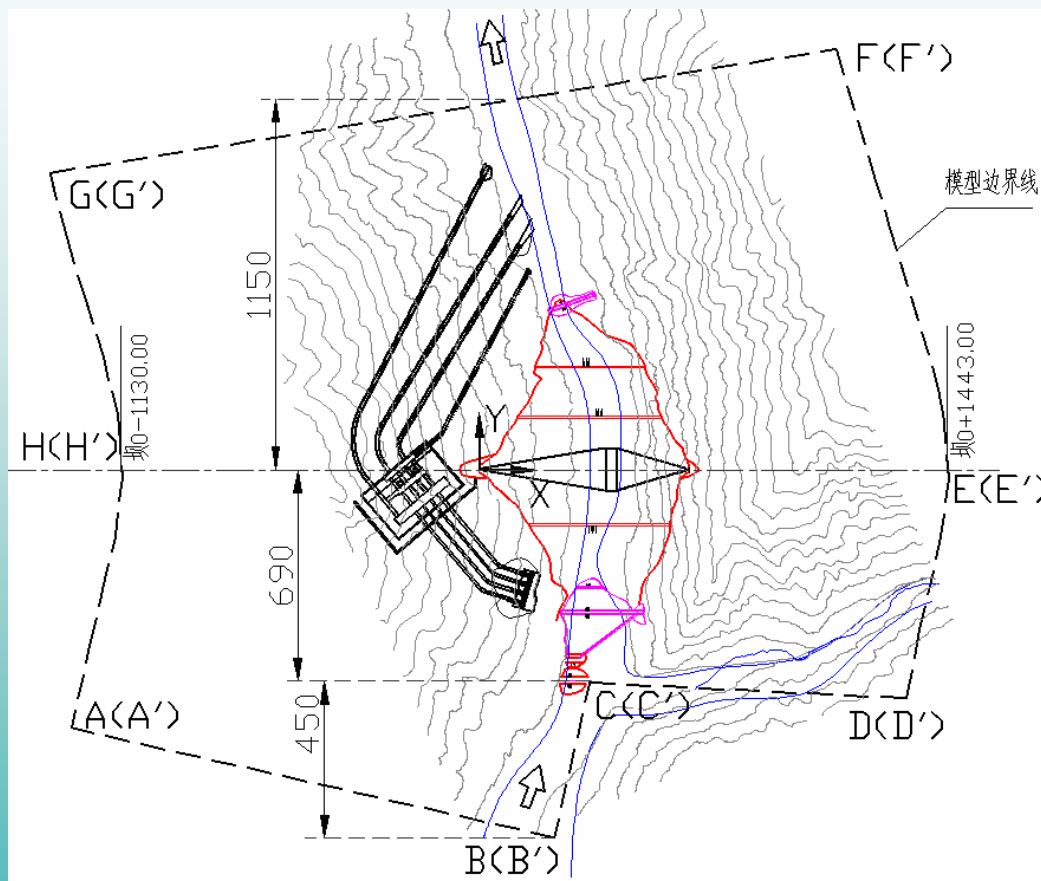
1. 河床基岩面35~40m深度下 $q \leq 3Lu$ ，75~80m深度下 $q \leq 1Lu$;
2. 左岸44m~52m深度下 $q \leq 3Lu$ ，59m~108m深度下 $q \leq 1Lu$;
3. 右岸20m~28m深度下 $q \leq 3Lu$ ，57m~135m深度下 $q \leq 1Lu$
4. 深部岩体具有启动压力梯度





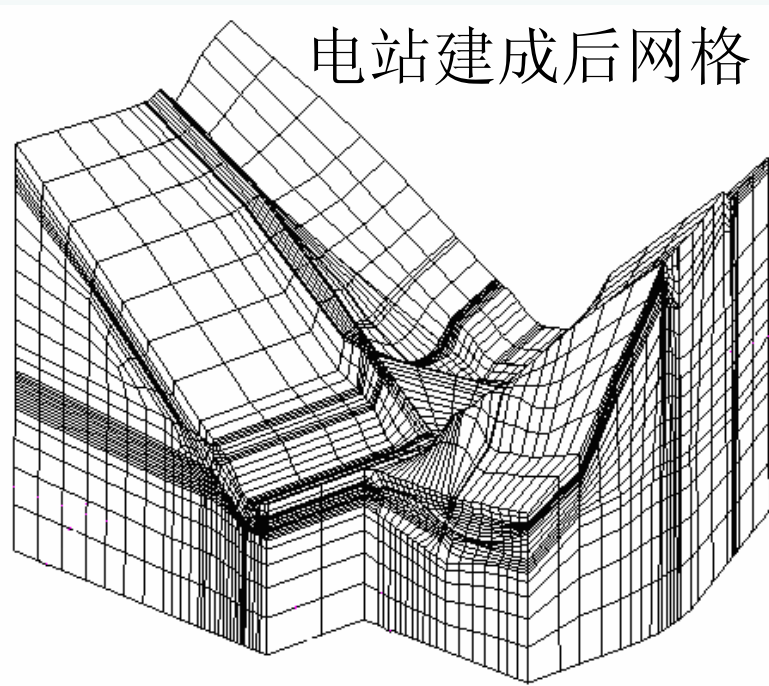
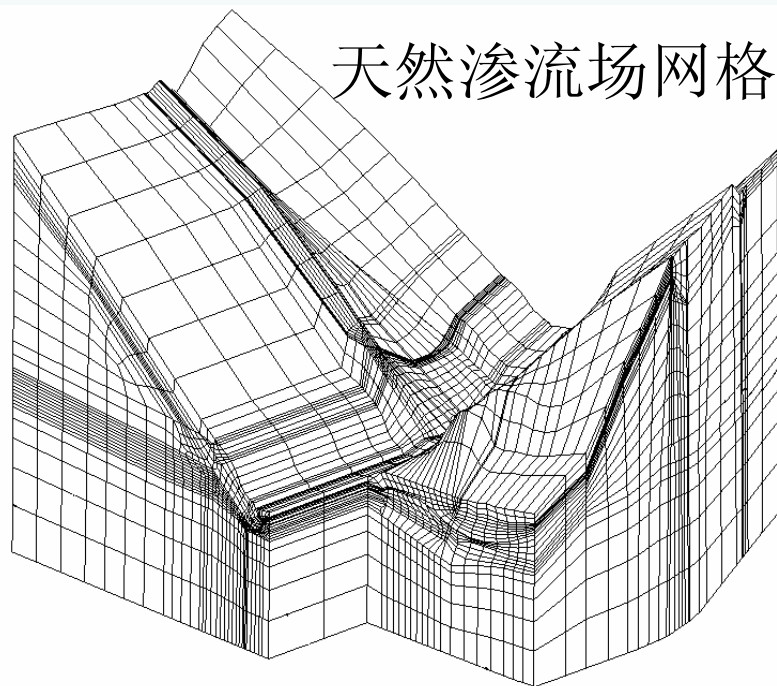
典型剖面图

双江口工程的计算区域



- 2 km × 2 km, 含坝基、坝体、地下厂房

计算网格

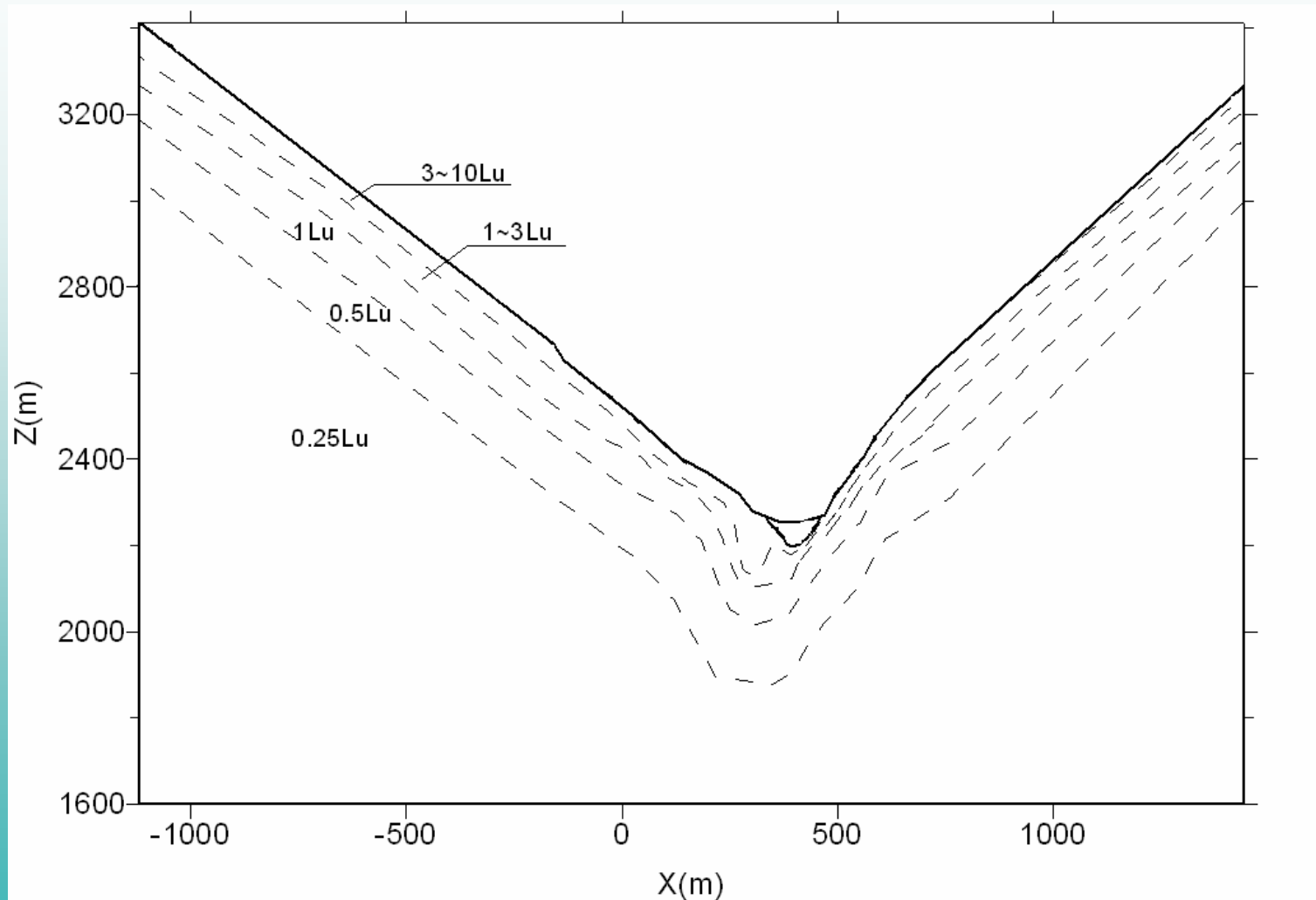


- 电站建成后网格共33131个20节点六面体单元和325个15节点三棱柱单元，共143811个节点

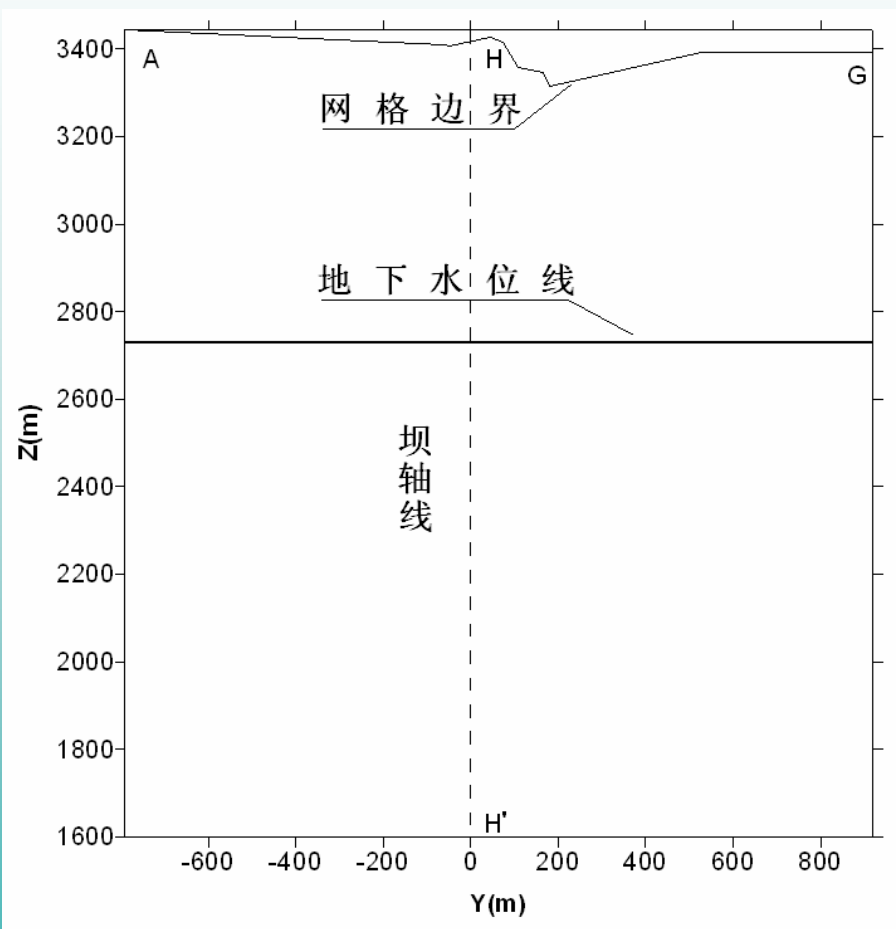
天然渗流场反演——钻孔水位与压水资料



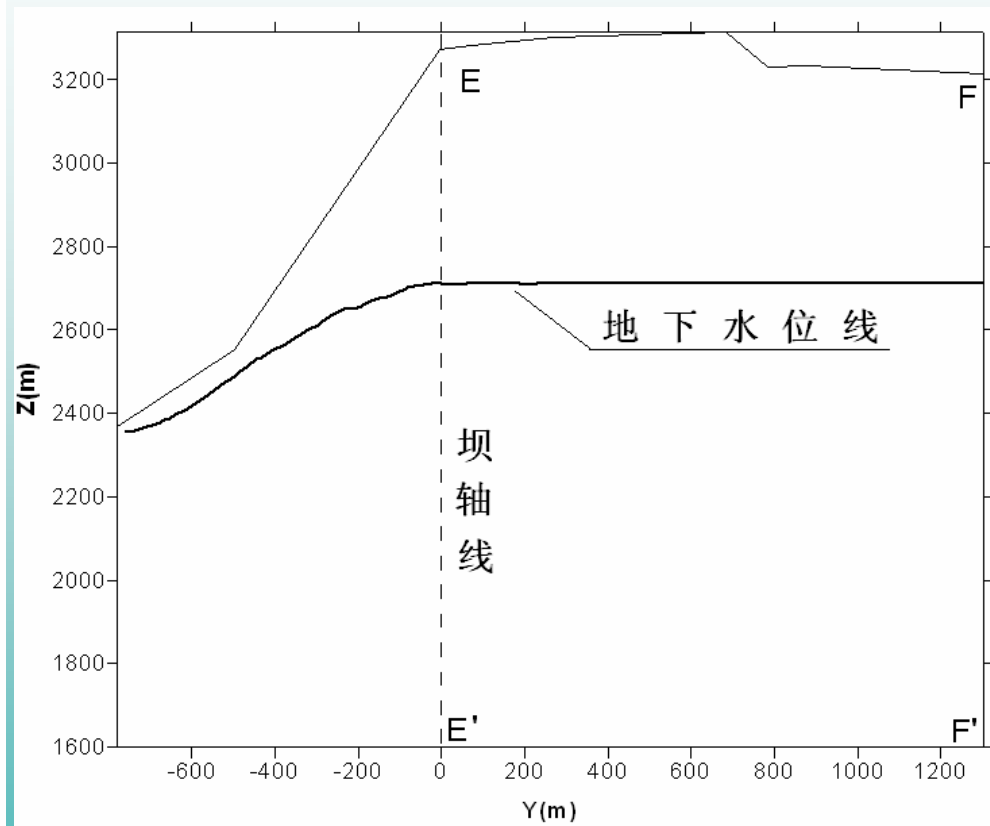
典型截面渗流参数



反演所得边界地下水位

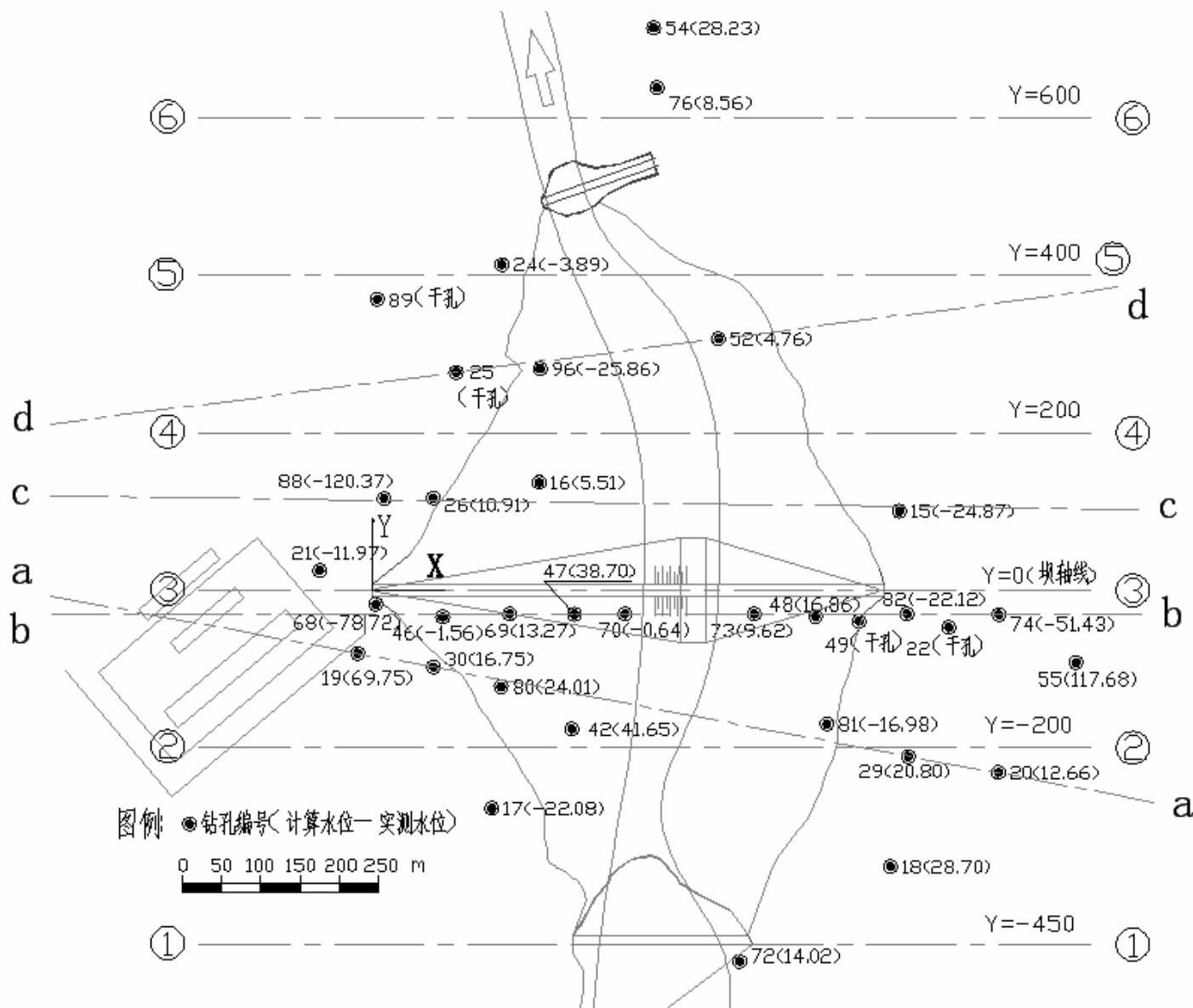


左侧边界

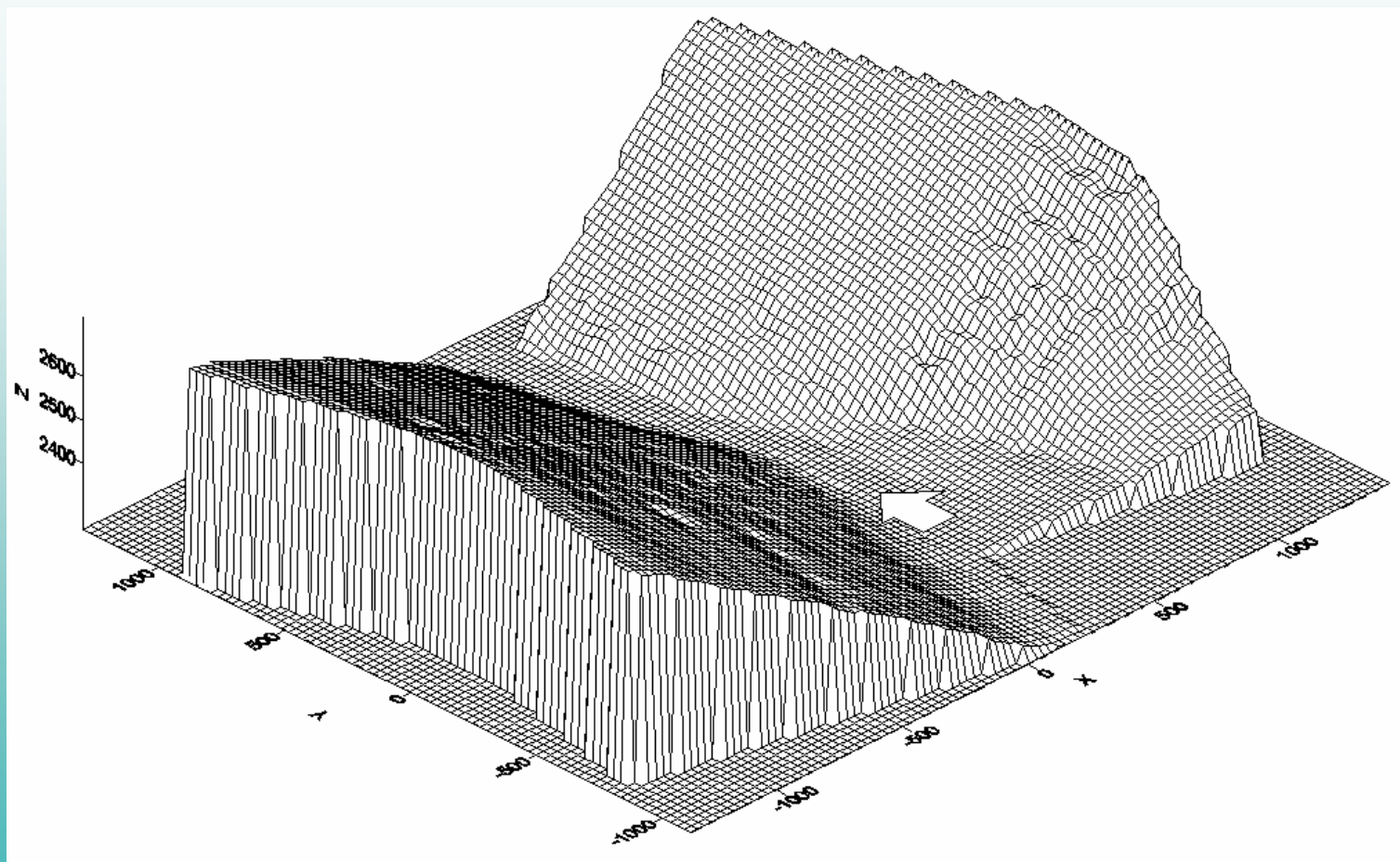


右侧边界

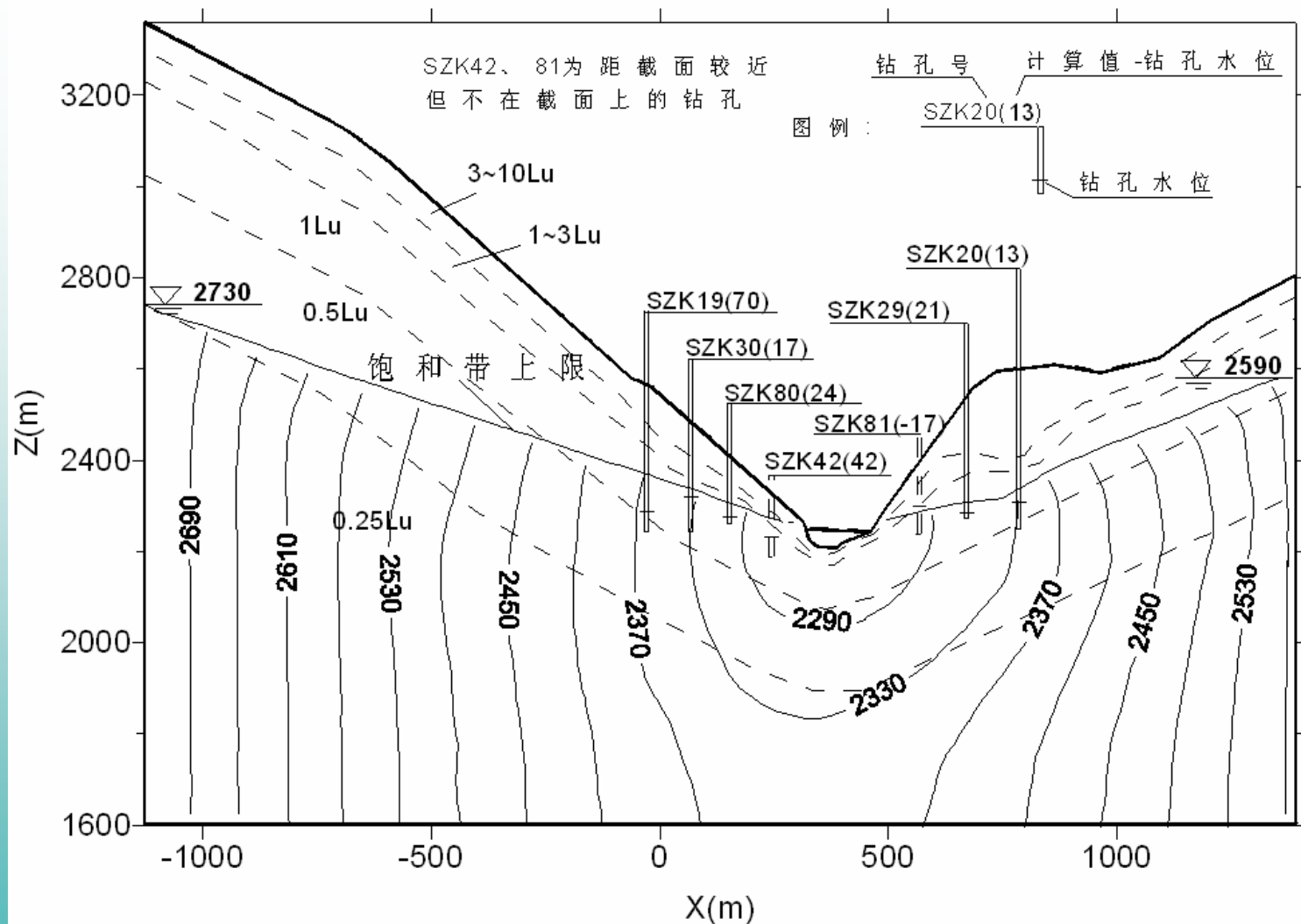
各测点水位计算值与实测值之差及各截面位置



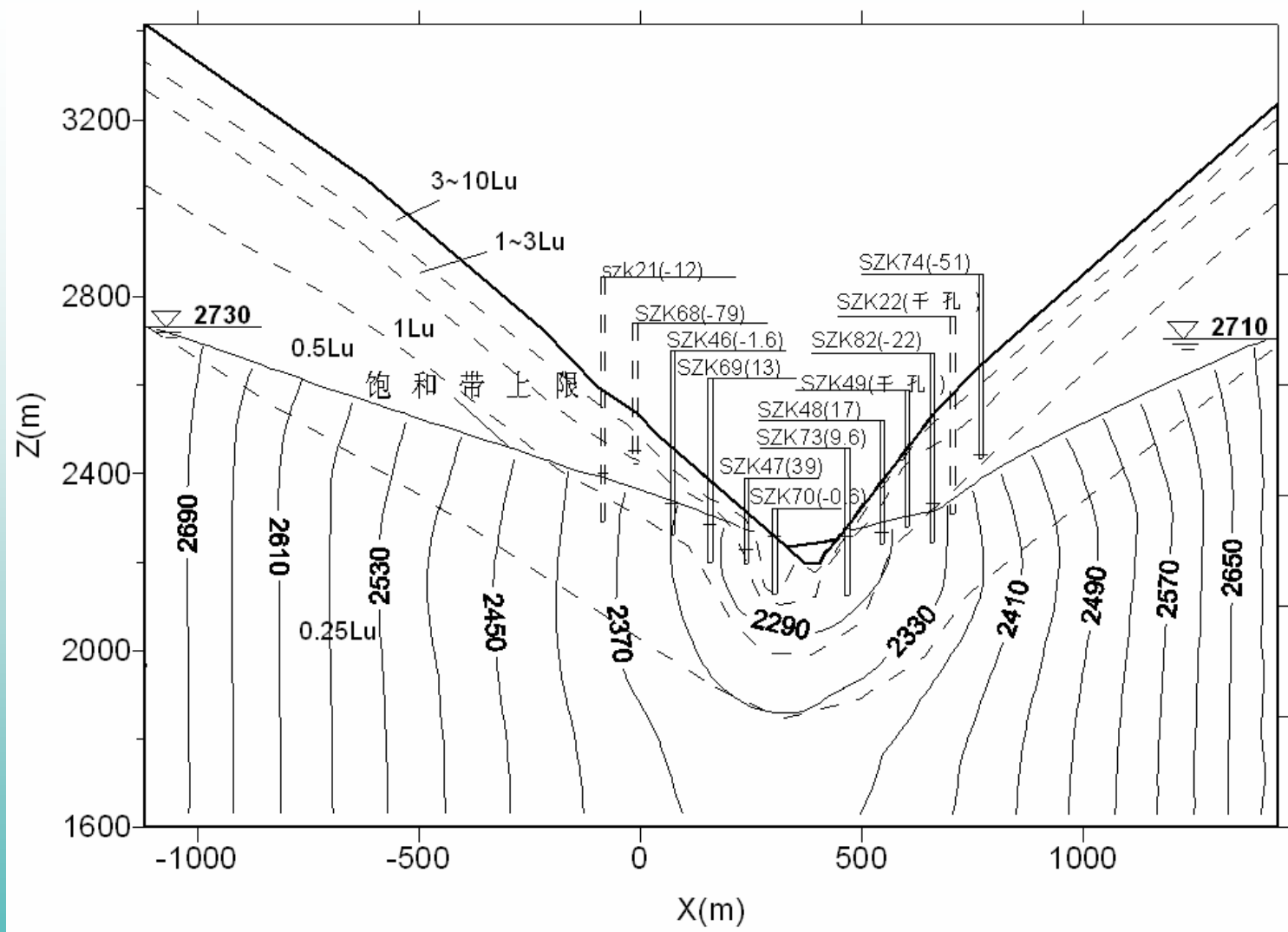
天然渗流场地下水水面线



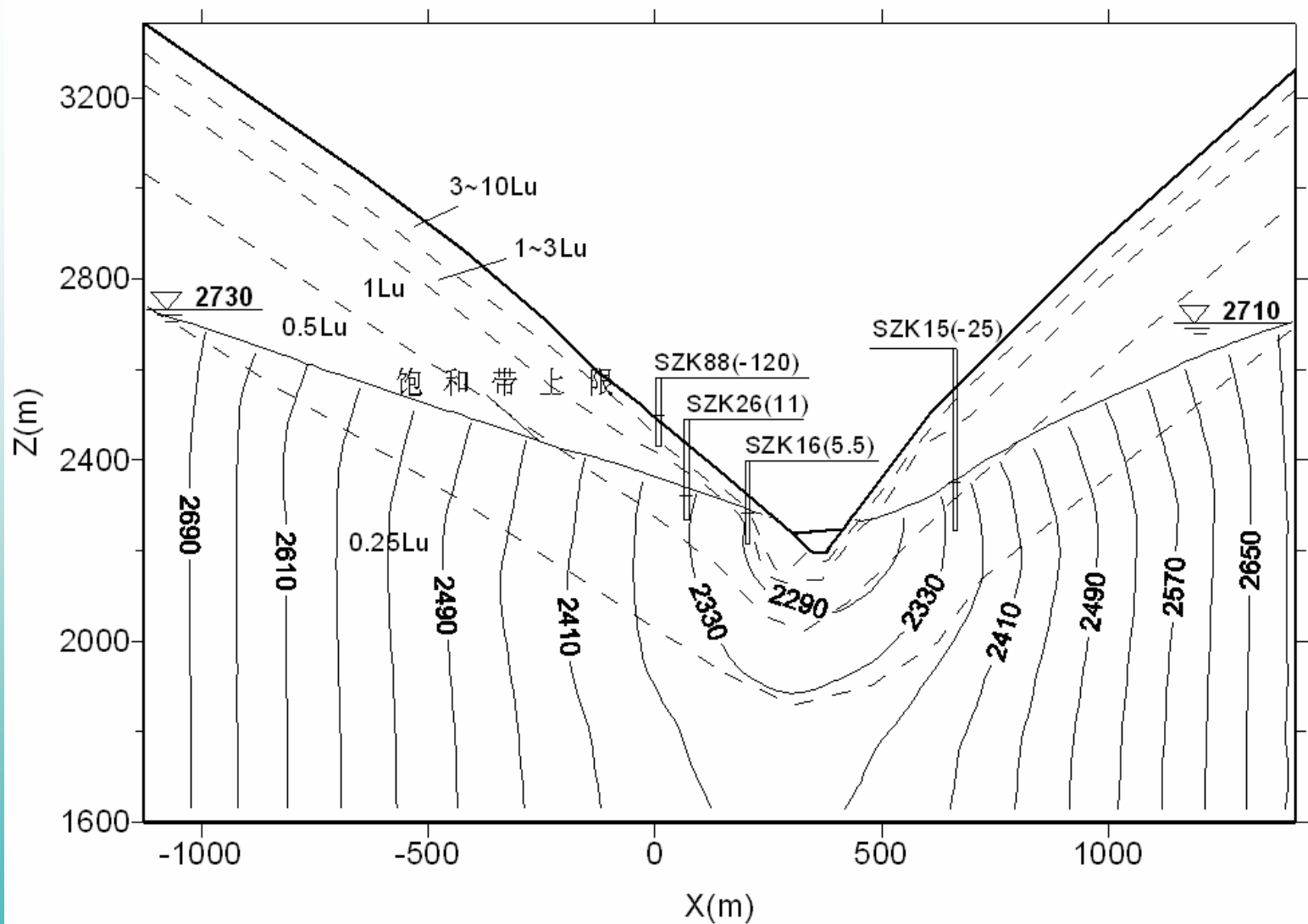
地下水水面线三维视图



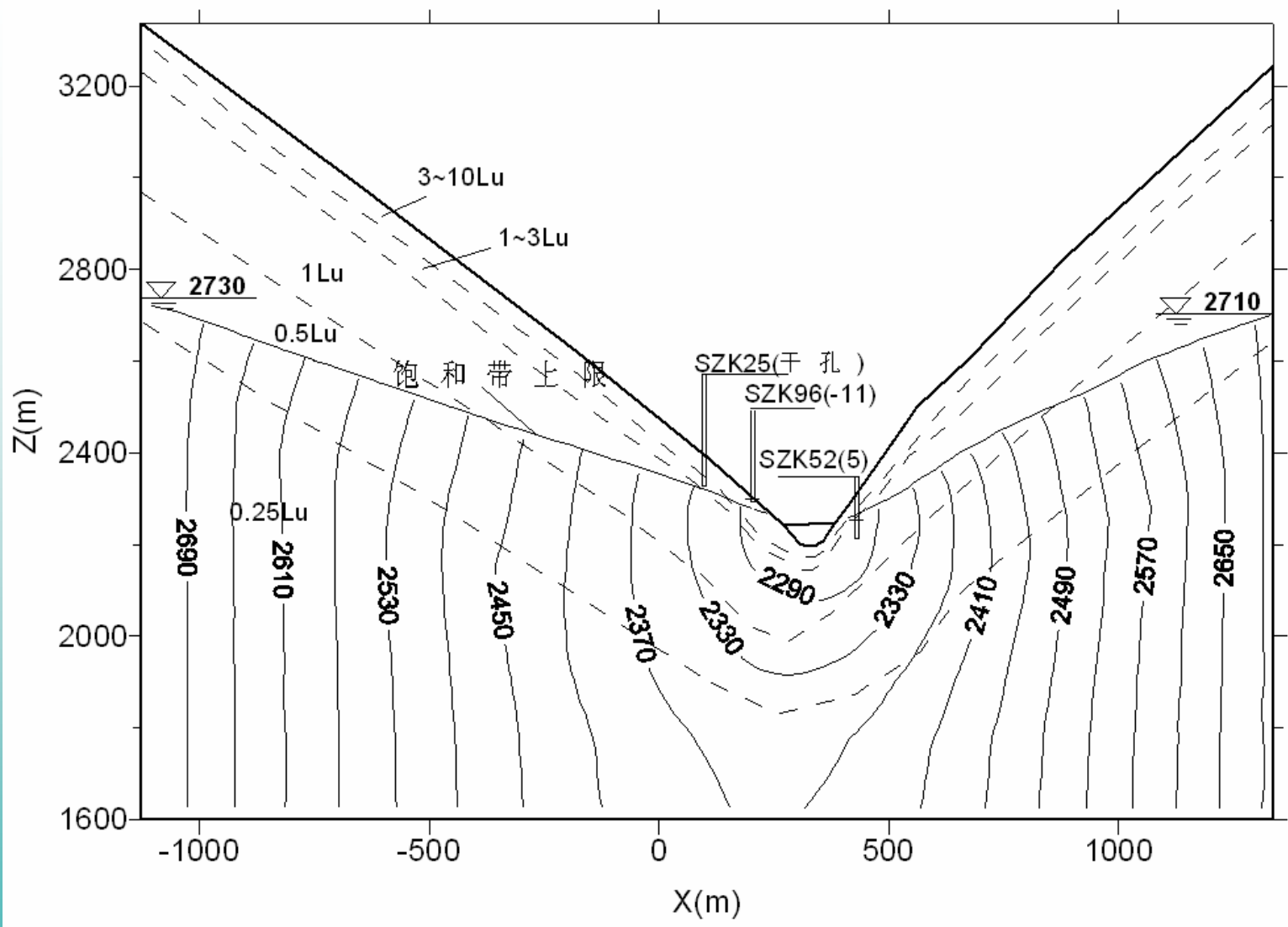
a-a剖面等水头线(m)与钻孔水位对比



b-b剖面等水头线(m)与钻孔水位对比



C-C剖面等水头线(m)与钻孔水位对比

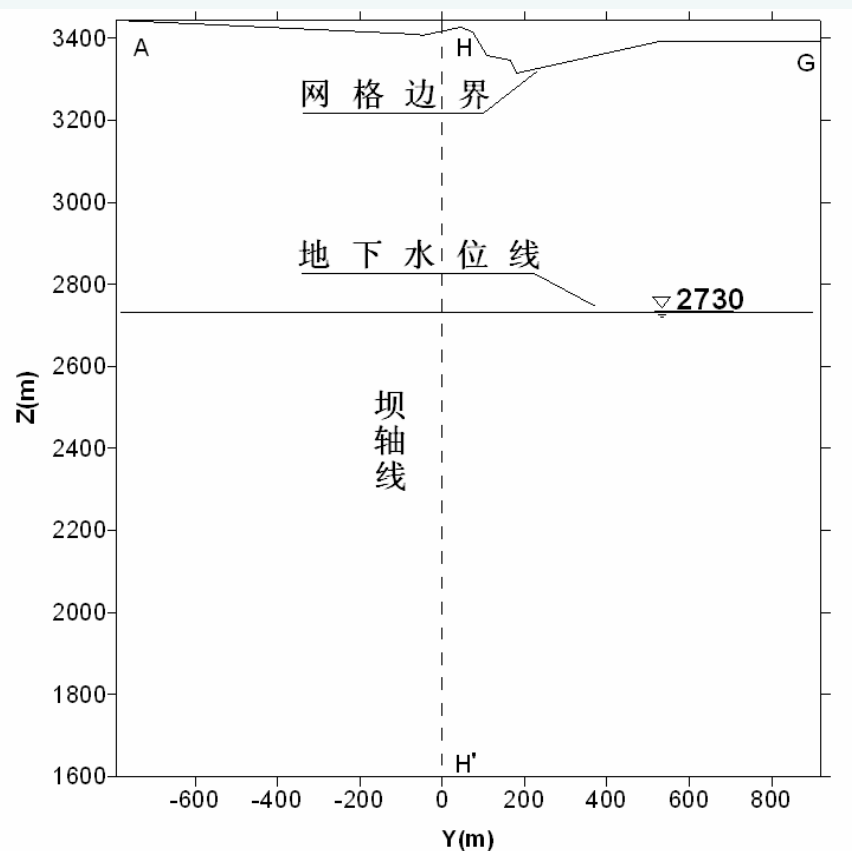


d-d剖面等水头线(m)与钻孔水位对比

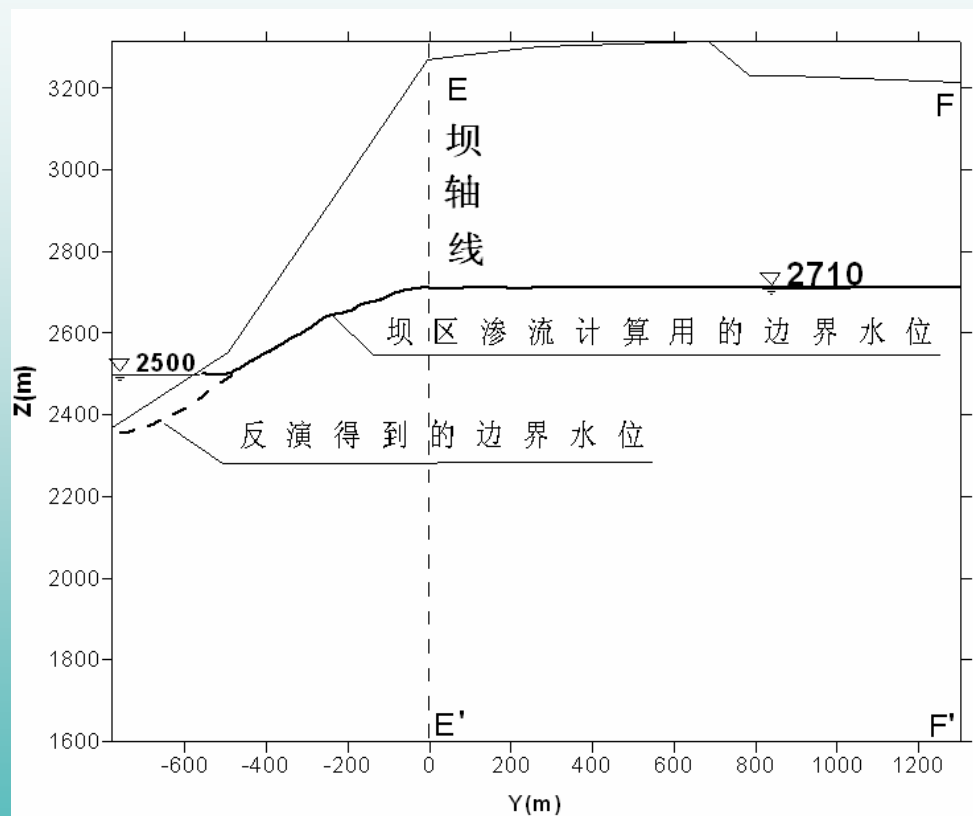
电站建成后渗流场计算

- 水库正常高水位2500.00m
- 下游水位2251.21m
- 稳定渗流状态，并通过渗流场的分析，对渗控措施的合理性进行论证，并提出优化建议

边界地下水位

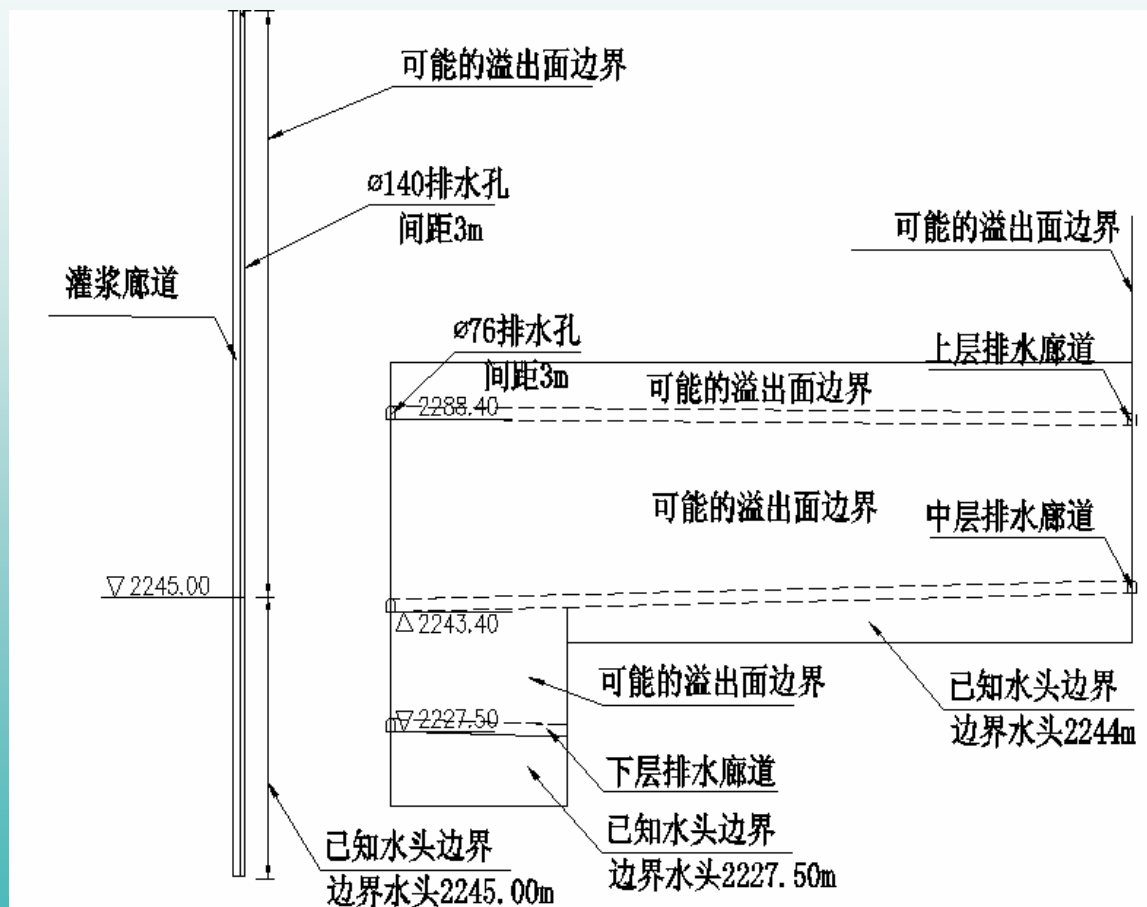


左侧边界



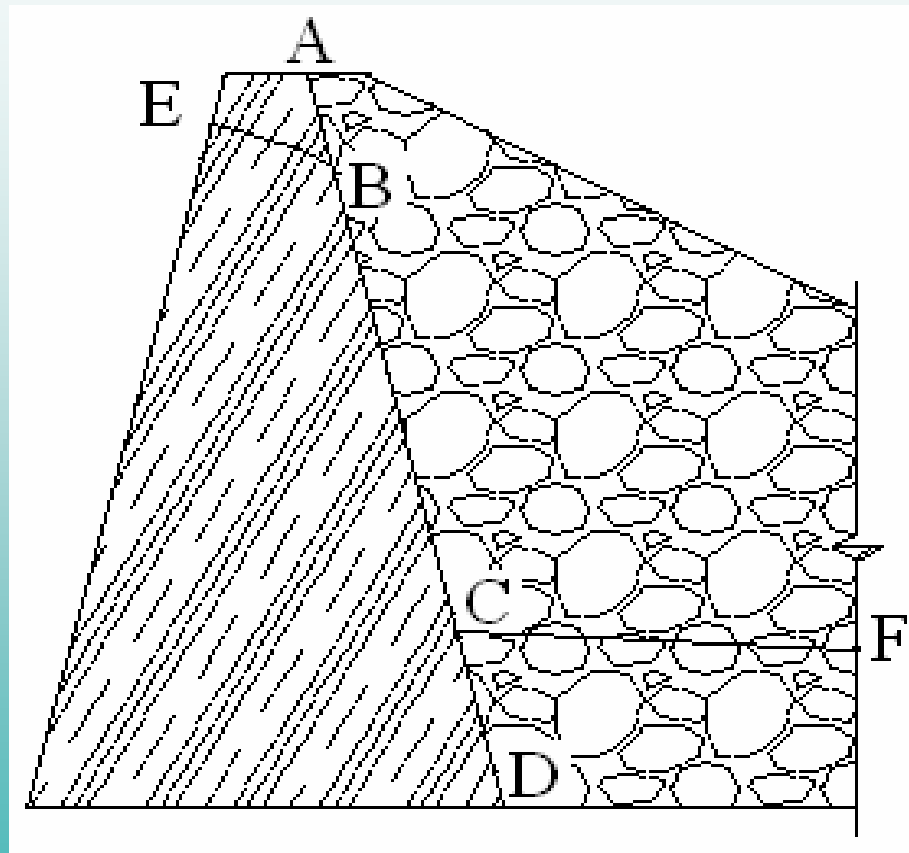
右侧边界

内部边界处理——廊道、排水孔幕、洞室边壁



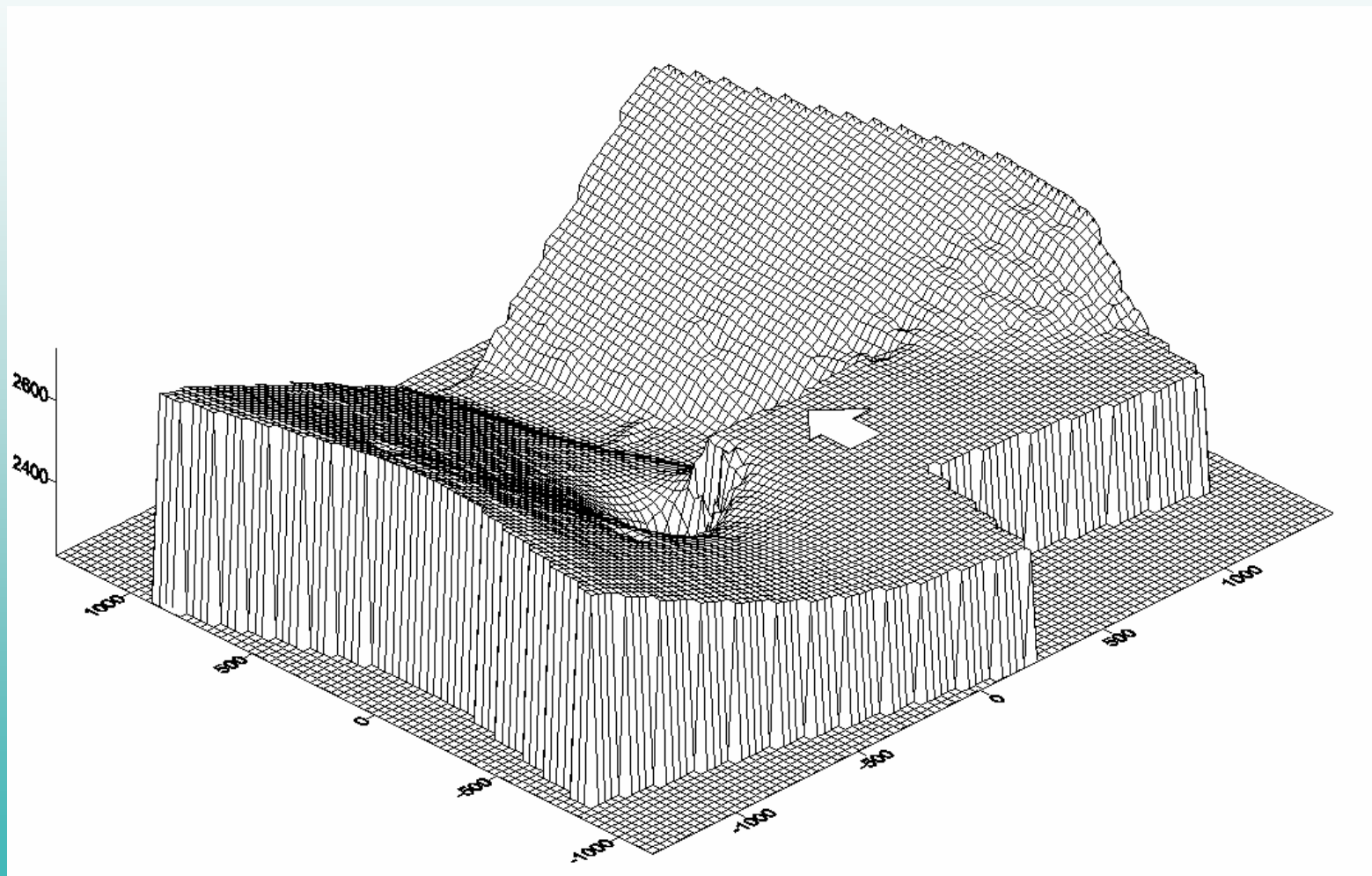
排水孔幕边界处理示意图

内部孔压间断面——心墙下游面，下游围堰心墙下游面、断层帷幕下游面

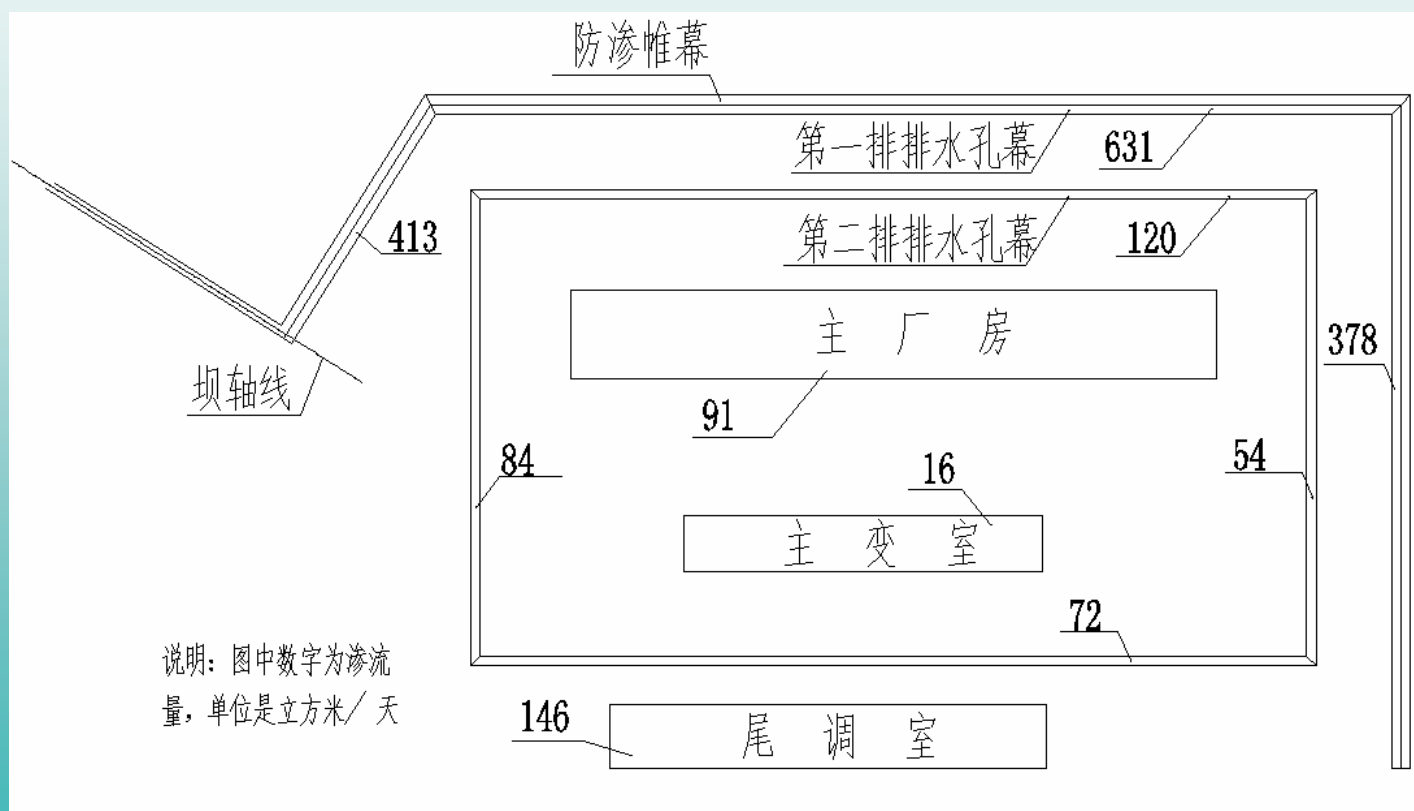


孔压间断面示意图

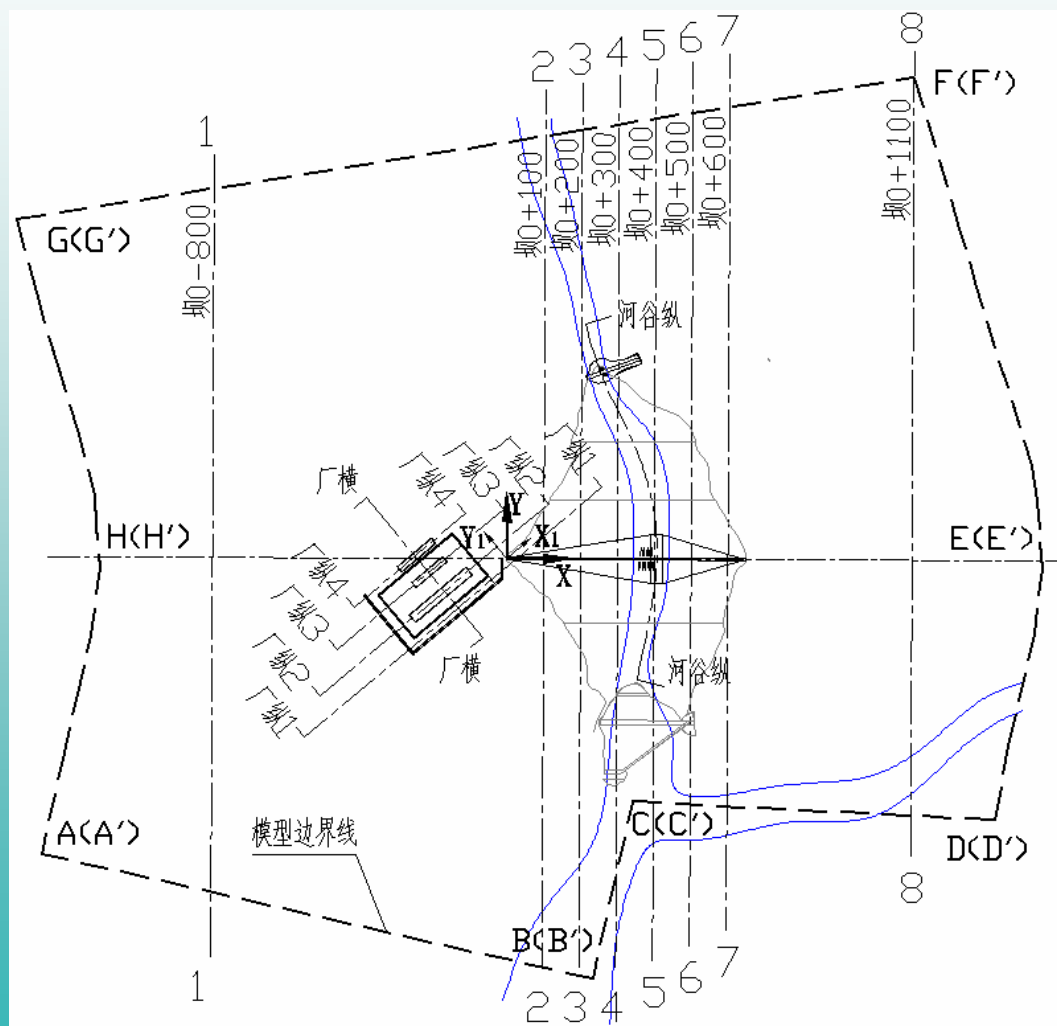
稳定渗流计算区域地下水自由面



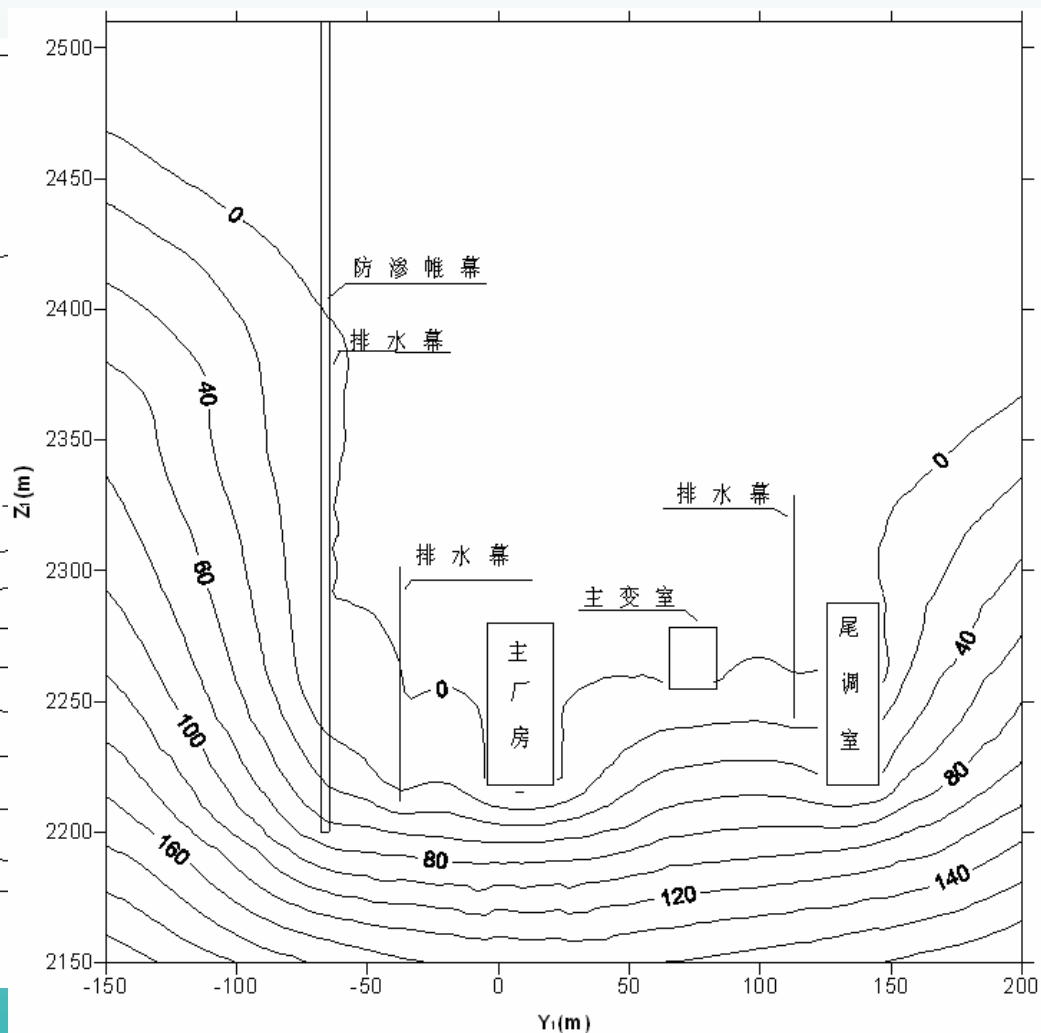
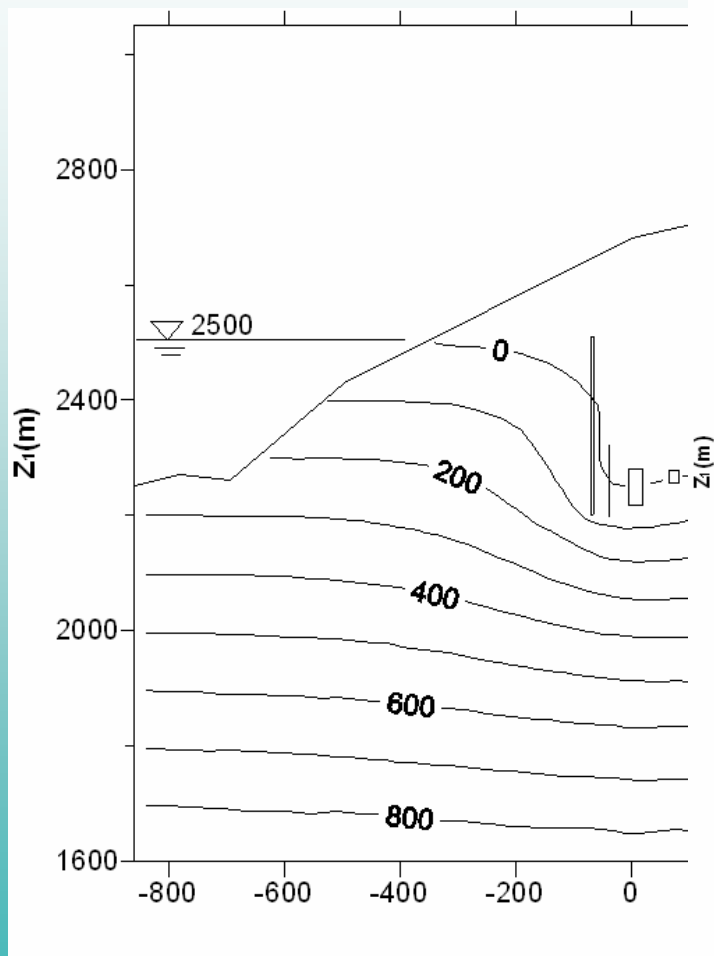
厂区各部位的渗流量



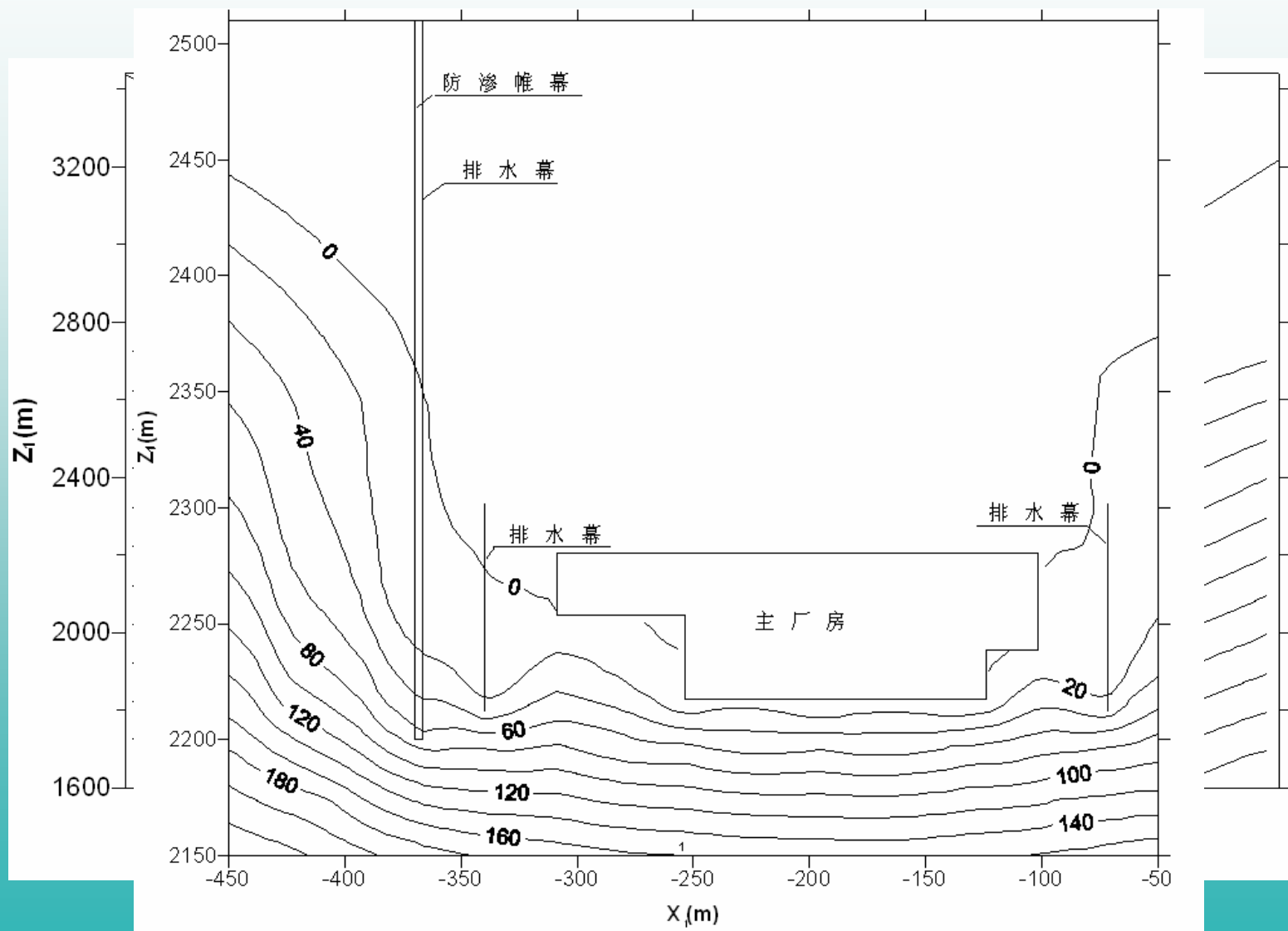
截取的各截面位置



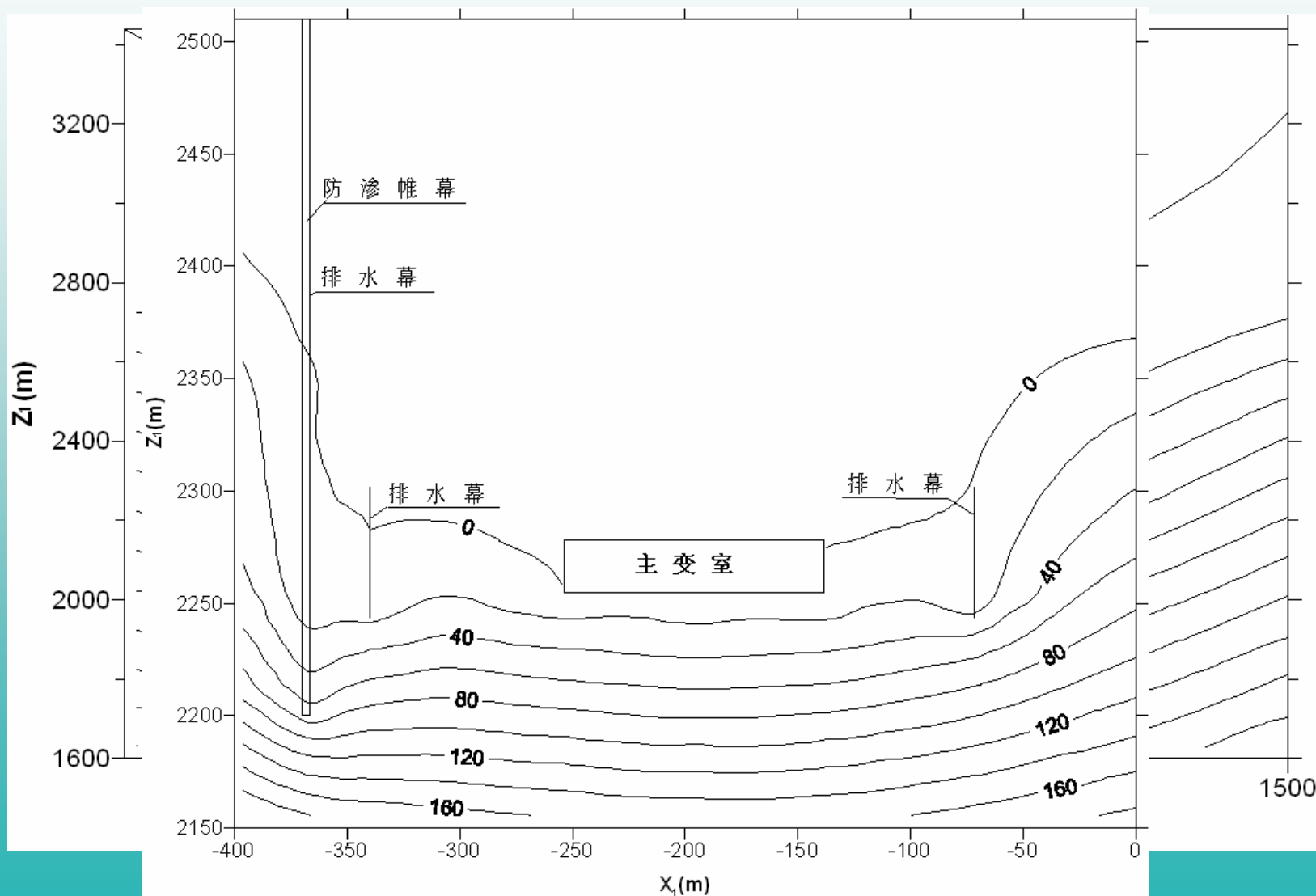
厂横1剖面等压力水头线(m)



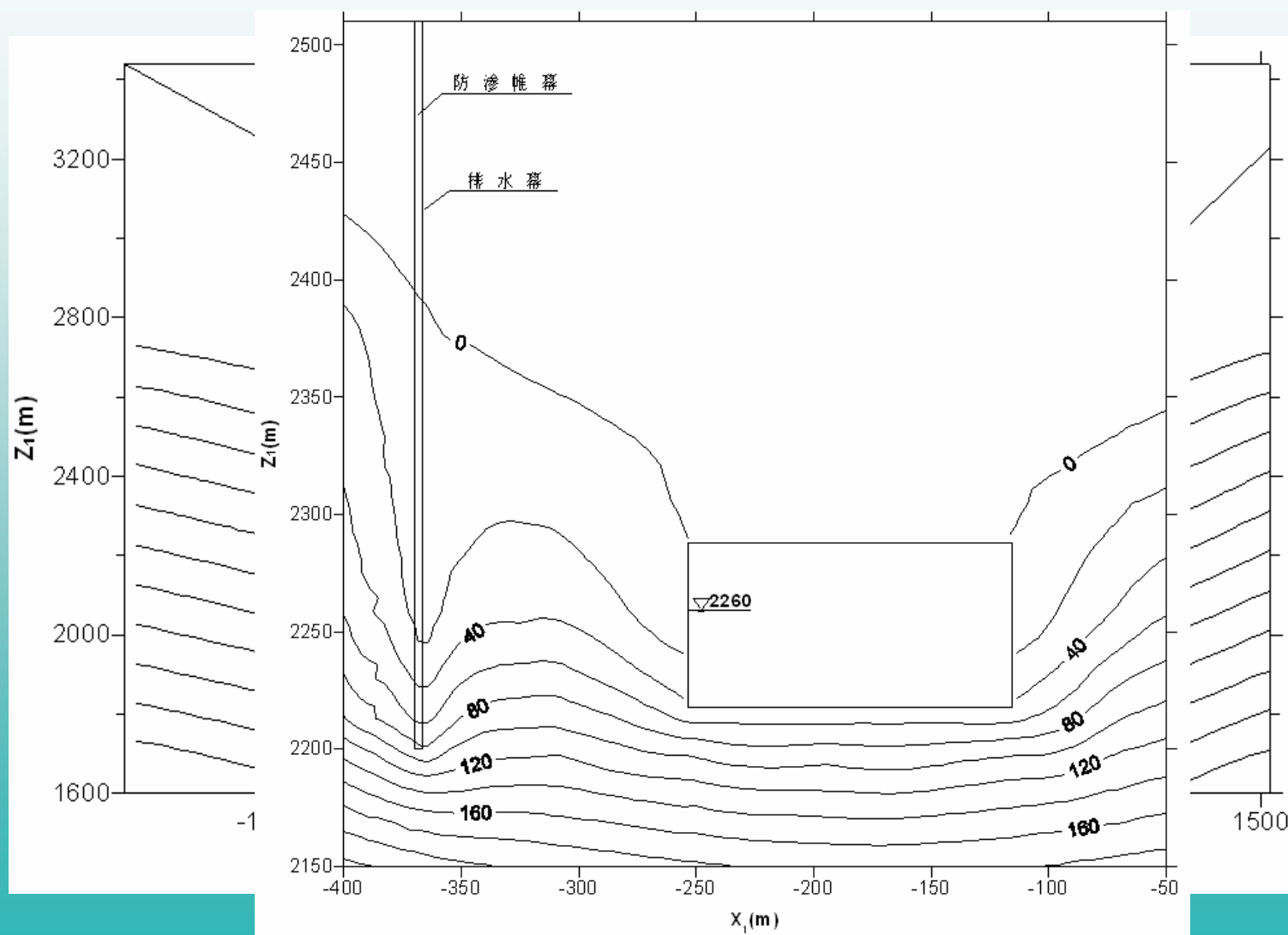
厂纵2剖面等压力水头线(m)



厂纵3剖面等压力水头线(m)



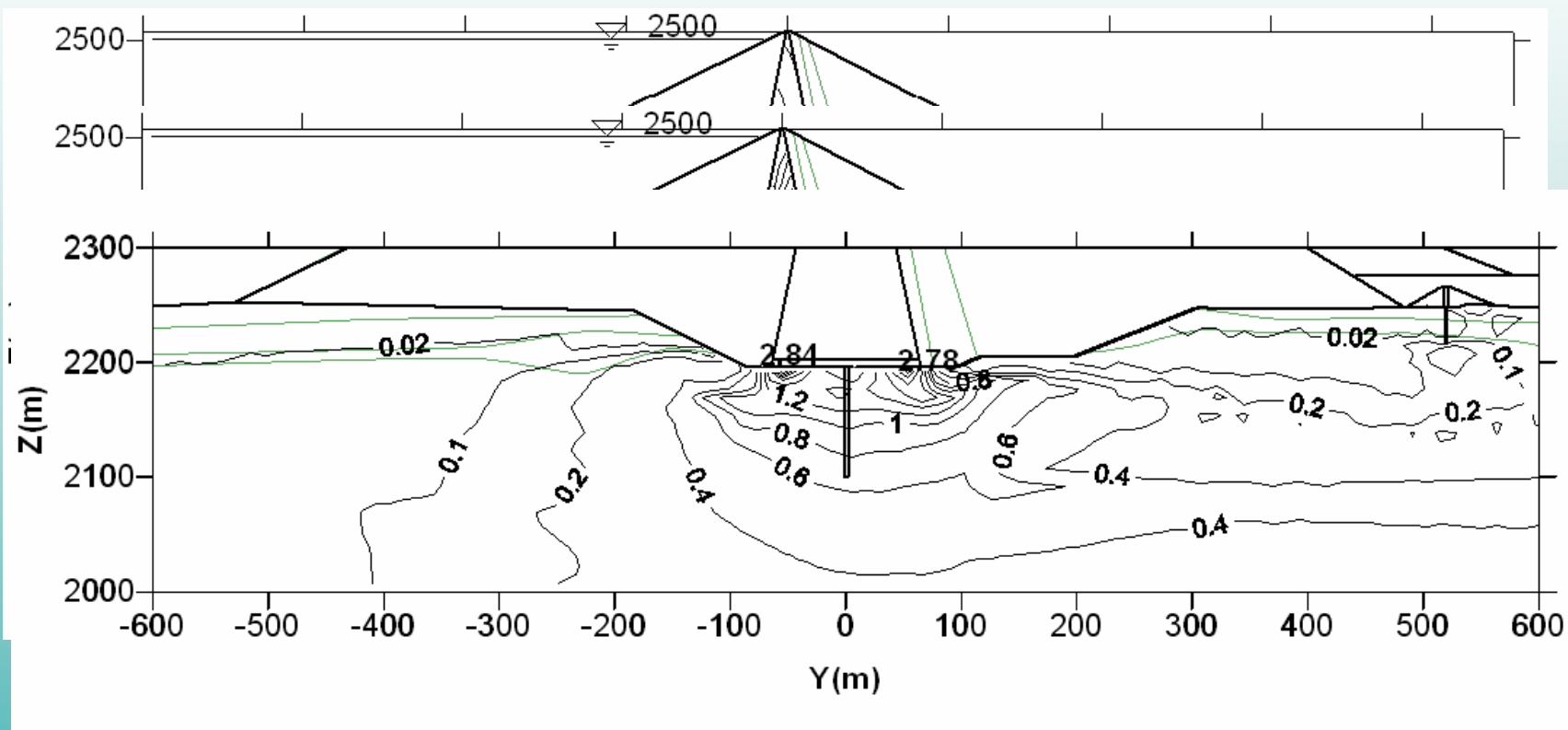
厂纵4剖面的等压力水头线(m)



厂房各部位的渗流状况小结

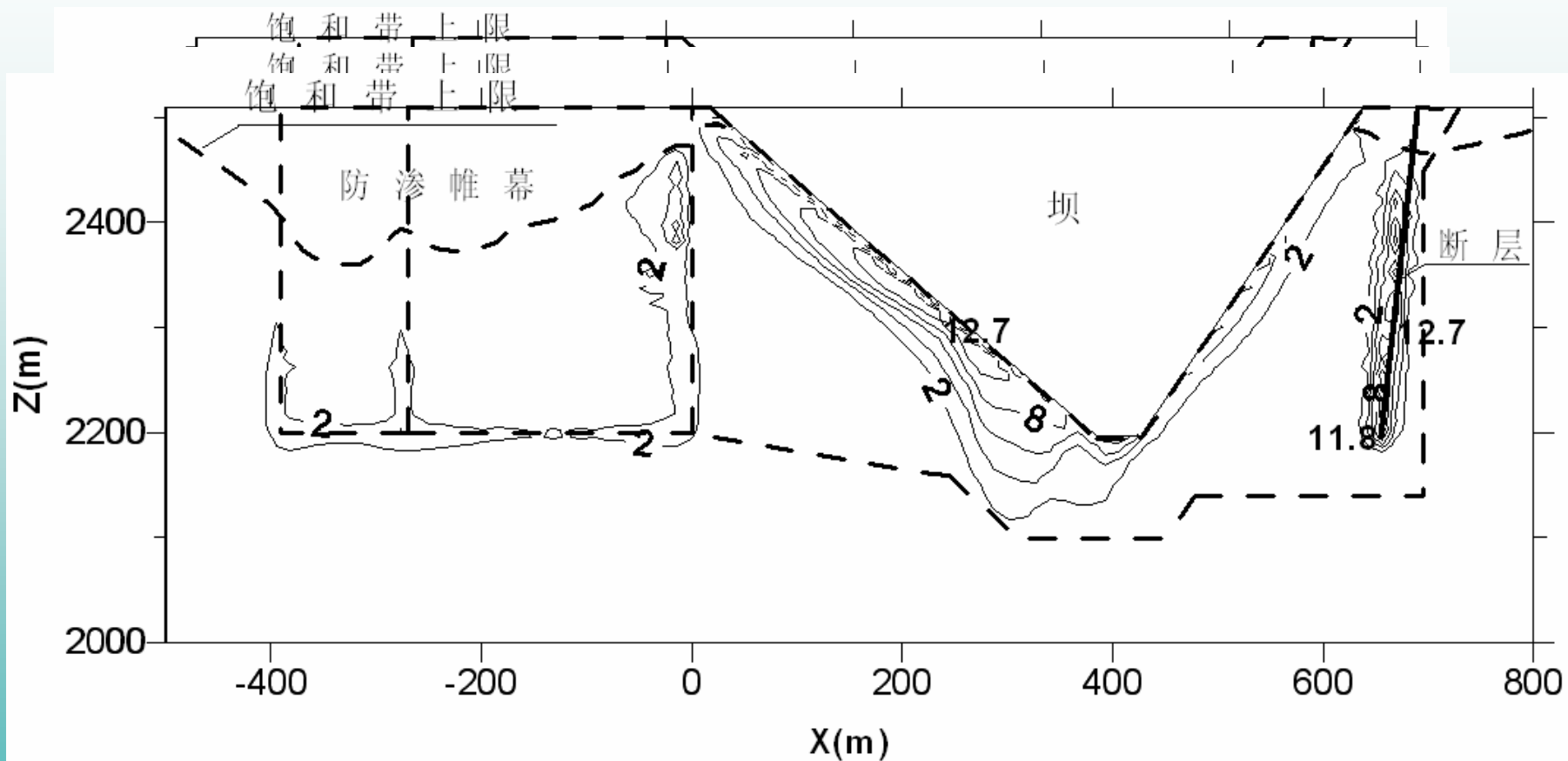
- 厂顶部为非饱和
- 厂底部和洞壁起排水作用
- 排水措施合理有效

河谷纵剖面孔压、水头、坡降



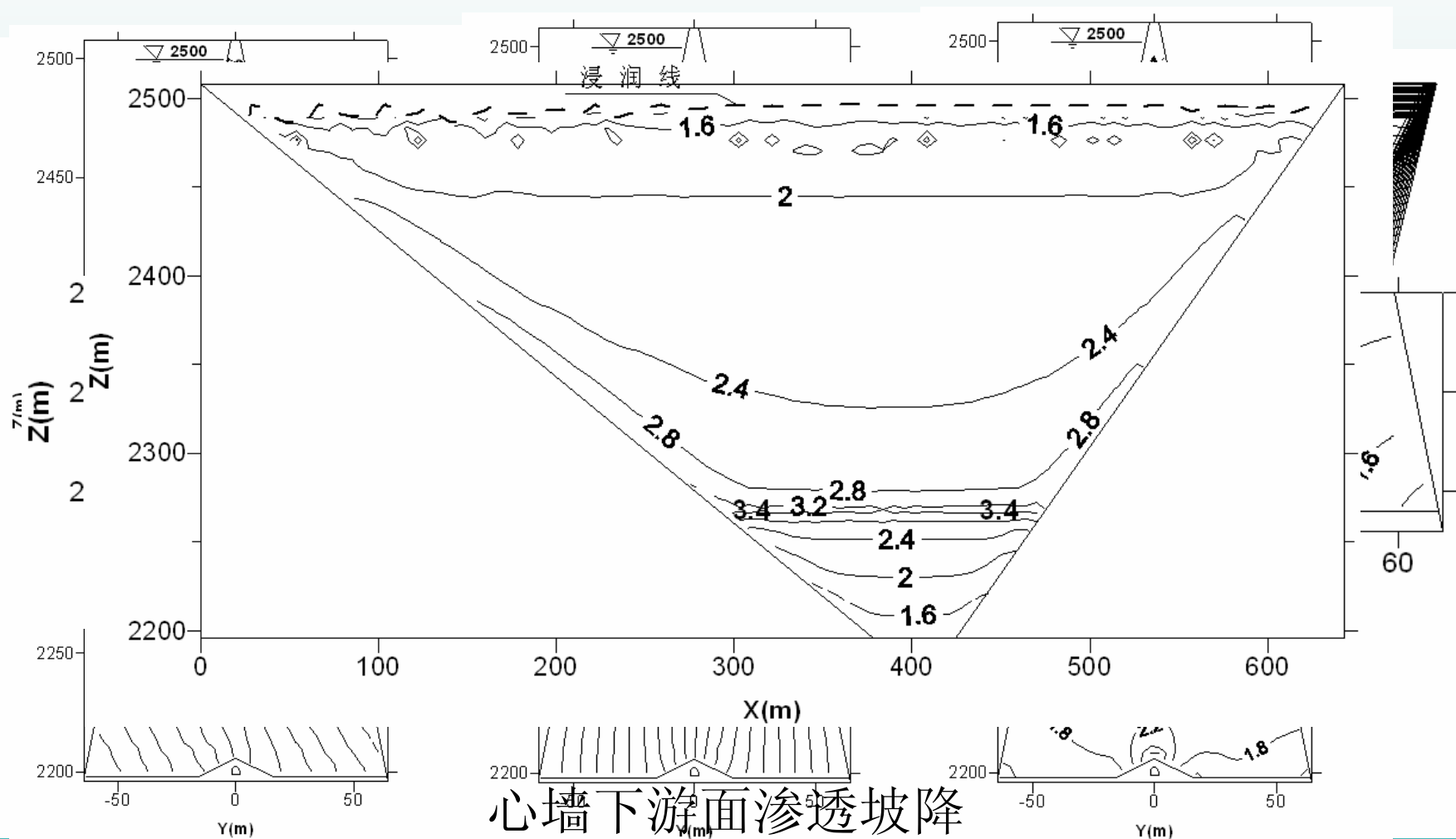
渗透坡降

帷幕上游侧截面孔压、水头、坡降



渗透坡降

心墙孔压、水头、坡降

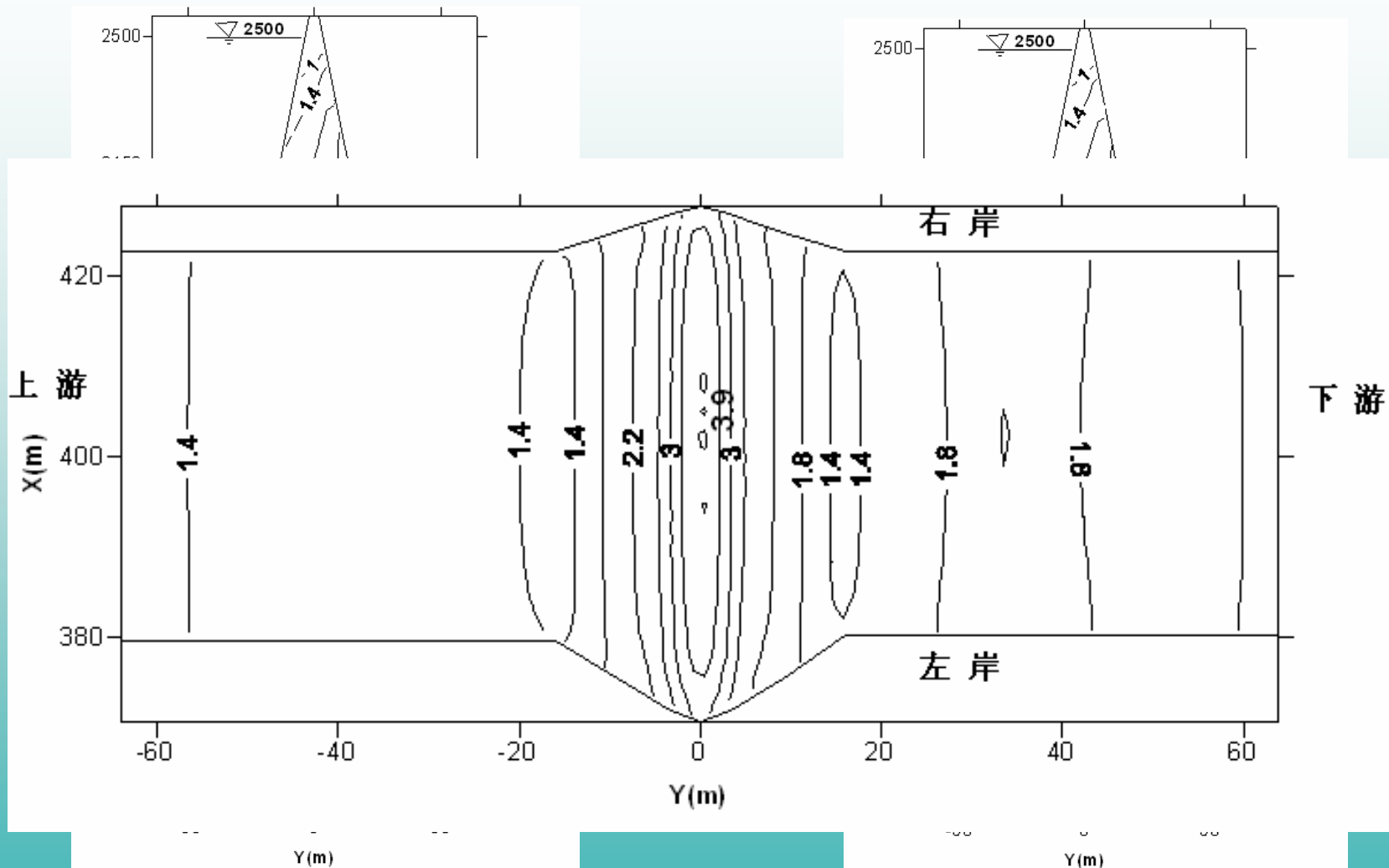


孔压

水头 %

渗透坡降

心墙接触渗透坡降



心墙左岸

心墙底部

心墙右岸

渗流量

厂区各部位渗流量

位置	地下洞室			排水孔幕	
	主厂房	主变室	尾调室	第1道	第2道
渗流量 (m ³ /d)	91	16	146	1422	330

防渗平面各部位渗流量

位置	左岸帷幕	右岸帷幕	左岸帷幕 外山体	右岸帷幕 外山体	坝体	总计
渗流量 (m ³ /d)	3121	959	418	22	1161	5681

- 渗流量满足要求

渗透坡降

坝区各部位的渗透坡降（基本方案）

部位	最大渗透坡降	允许渗透坡降
心墙上游顶部坡降	1.9	4
心墙下游侧出逸坡降	3.4	4
心墙与基座接触部位	3.9	4
坝体防渗帷幕	12.7	20
漂卵砾石	0.033	0.12~0.15
含漂卵砾石层	0.0008	0.12~0.15
含泥的砂卵砾石层	0.022	0.17~0.22

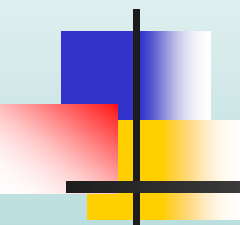
■ 渗透坡降满足要求

双江口工程渗流计算结论

- 防渗措施设计合理
- 渗透坡降满足渗透稳定性要求
- 厂房顶部处于地下水位以下

总结

- 1 SEEPAGE能解决饱和—非饱和非稳定渗流问题，能包含各向异性问题
- 2 溢出面边界处理技术先进、数值计算稳定、计算精度高
- 3 模拟孔压间断
- 4 经过考题和大型工程计算考验
- 5 软件不断维护、改进和发展



谢谢！

？ 问题与探讨